



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**NÁVRH TVARU KAPOTY ZÁVODNÍHO VOZIDLA NA
ZÁKLADĚ ANALÝZY PROUDĚNÍ**

RACE CAR BONNET SHAPE DESIGN BASED ON FLOW ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Šnajdr

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Michalec

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Petr Šnajdr**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Michalec**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh tvaru kapoty závodního vozidla na základě analýzy proudění

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tvar kapoty závodních vozidel významně ovlivňuje jízdní vlastnosti a výkonnost. Kapota je rovněž součástí pneumobilu, závodního vozidla poháněného stlačeným vzduchem, pokrývající vrchní a přední část vozidla. Doposud byla kapota navrhována pouze pro estetické účely, avšak inženýrský přístup pro návrh tvaru kapoty je výhodnější pro další posun v oblasti vývoje a získání výhody nad soupeři v mezinárodní soutěži pneumobilů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je navrhnout tvar kapoty pneumobilu Typhoon dle výsledků CFD simulace pro co nejnižší odpor vzduchu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- navrhnout tři koncepty kapoty a vytvořit 3D modely s respektováním geometrie konstrukce pneumobilu,
- navrhnout okrajové podmínky a provést CFD simulaci,
- porovnat a zhodnotit získané výsledky,
- volba finálního tvaru a zdůvodnění.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, návrhový výkres, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

TU, Jiyuan, Guan Heng YEOH a Chaoqun LIU. Computational fluid dynamics: a practical approach. Third edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018, xix, 477 stran : ilustrace. ISBN 978-0-08-101-27-0.

DVOŘÁK, Rudolf a Karel KOZEL. Matematické modelování v aerodynamice. Praha: ČVUT, 1996, 356 s. ISBN 80-01-01541-6.

KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0-8376-0142-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá snižováním aerodynamického odporu pneumobilu. Shrnuje poznání v oblasti aerodynamiky vozidel a principu CFD simulací. Podstatou práce je návrh tvaru kapoty pro závodní pneumobilu Typhoon, vyvíjeného na FSI VUT, pro co nejnižší odpor vzduchu. K pozorování a analyzování vlivu tvaru kapoty na aerodynamické vlastnosti je využíváno CFD simulací. Navržené tvarové řešení kapoty významně přispívá ke snížení aerodynamického odporu oproti stávající kapotě. Díky tomu jsou zlepšeny výkonnostní parametry vozidla od maximální rychlosti až po dojezdovou vzdálenost. Získané poznatky mohou také pomoci při dalším vývoji pneumobilů a při zlepšování nastavení výpočetního modelu popsaném v práci.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika vozidel, CFD simulace, snižování odporu vzduchu, pneumobil, kapota

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with reducing aerodynamic drag of a pneumobile. The thesis summarizes knowledge in the field of vehicle aerodynamics and the principle of CFD simulations. The essence of the work is bonnet shape design of racing pneumobile Typhoon, developed at FME BUT, for lowest possible air resistance. CFD simulations are used to observe and analyse the influence of the bonnet shape on the aerodynamics properties. The designed shape solution of the bonnet significantly contributes to the reduction of aerodynamic drag compared to the existing bonnet. Thanks to this, the vehicle's parameters are improved from maximum speed to the range. The acquired knowledge can also help in the further development of pneumobiles and in improving the setting of the computational model described in the work.

KEYWORDS

car aerodynamics, CFD simulation, air resistance reduction, pneumobile, bonnet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠNAJDR, Petr. *Návrh tvaru kapoty závodního vozidla na základě analýzy proudění*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132167>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Michal Michalec.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Michalovi Michalcovi za odborné vedení, cenné rady, podněty, připomínky a ochotu při zpracovávání této bakalářské práce. Také bych rád poděkovat své rodině za podporu během studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Michala Michalce. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Obecný základ aerodynamiky	14
2.1.1	Vlastnosti vzduchu	14
2.1.2	Proudění a jeho typy	15
2.1.3	Rovnice používané v aerodynamice	16
2.2	Silové účinky proudícího vzduchu na vozidlo	18
2.2.1	Aerodynamický odpor	19
2.2.2	Aerodynamický vztlak	26
2.2.3	Aerodynamická boční síla a momenty	26
2.3	Vliv tvaru karoserie na velikost odporu a vztlaku	27
2.3.1	Přední část	28
2.3.2	Zadní část	29
2.3.3	Střední část	30
2.3.4	Podvozek	31
2.4	Přídavné aerodynamické prvky vozidel	31
2.4.1	Přední spoiler	32
2.4.2	Zadní spoiler	32
2.4.3	Boční spoilery	33
2.4.4	Deflektor	34
2.4.5	Generátory vírů	34
2.4.6	Difuzor	35
2.5	CFD simulace	35
2.5.1	Princip funkce CFD modelování	36
2.5.2	Modelování turbulentního proudění	37
2.5.3	Postup výpočtu CFD simulací	38
2.5.4	Oblasti využití	40
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	41
3.1	Analýza problému	41
3.2	Cíl práce	41
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	42
4.1	Varianta I	43
4.2	Varianta II	44

4.3	Varianta III	45
4.4	Varianta IV	46
4.5	CFD analýza koncepčních variant	47
4.6	Výsledky koncepčních návrhů	48
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	49
5.1	Finální tvarové řešení kapoty	49
5.2	Návrh rozdělení kapoty	51
5.3	Základní rozměry	52
5.4	Ergonomie kapoty	53
5.5	Postup a nastavení CFD analýzy	53
5.5.1	Příprava geometrie	54
5.5.2	Tvorba sítě	55
5.5.3	Výpočet a okrajové podmínky	58
5.5.4	Výsledky a úprava simulace	60
5.6	Porovnání výsledků navržené a aktuální kapoty	64
5.6.1	Aerodynamický odpor a valivý odpor	64
5.6.2	Maximální rychlost	65
5.6.3	Dojezdová vzdálenost	66
6	DISKUZE	68
7	ZÁVĚR	71
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	75
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	78
11	SEZNAM TABULEK	81
12	SEZNAM PŘÍLOH	82

1 ÚVOD

Aerodynamika je velmi důležitou a podstatnou částí návrhu dopravních prostředků. I když to nemusí být na první pohled zřejmé, tak mnoho prvků a výsledný tvar vozidel je ovlivněno aerodynamickou optimalizací. U vozidel se jí musí věnovat podstatná část vývoje, jelikož ovlivňuje mnoho aspektů od designu, jízdních vlastností až po ekonomickou stránku výroby a provozu.

Osobní a nákladní vozidla se soustředí převážně na snížení odporu vzduchu z důvodu nižší spotřeby paliva. Obzvláště v dnešní době je na tuto oblast kladen velký důraz z důvodu narůstající elektromobility a s tím spojenou dojezdovou vzdáleností. Naproti tomu závodní vozidla, které mají nízkou hmotnost a dosahují vysokých rychlostí se zaměřují na přítlačnou sílu vzduchu, aby při rychlé jízdě neztratily přilnavost s vozovkou. K tomuto účelu se na závodní vozidla přidávají specifické aerodynamické prvky, které plní požadovanou funkci. Na druhou stranu tyto prvky mohou zvyšovat odpor vzduchu, takže je potřeba najít optimální řešení mezi dostatečnou přítlačnou silou a nízkým odporem vzduchu.

V této práci je řešena aerodynamika závodního pneumobilu Typhoon vyvíjeného na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Vozidlo pohánějí stlačený vzduch slouží především pro soutěžní účely a v současné době dosahuje maximální rychlosti okolo 50 km/h. Kvůli neustálému vývoji a zvyšující se rychlosti pneumobilů roste také význam aerodynamických vlastností. Současné kapoty byly však doposud navrhovány převážně z designérského hlediska. Proto zde vyvstává otázka, jak může zlepšit výkonnosti parametry pneumobilu kapota, která bude vyvíjena převážně za aerodynamickým účelem? Bakalářská práce se proto zabývá návrhem kapoty pro pneumobil Typhoon s cílem dosáhnout co nejnižšího odporu vzduchu. Kapota kromě zlepšení aerodynamických vlastností slouží také k ochraně řidiče a vnitřních součástí stroje, proto musí respektovat konstrukční geometrii pneumobilu. Pro posuzování aerodynamických vlastností navrhovaných řešení je využíváno CFD simulací, díky nimž je možné v digitální podobě optimalizovat tvar kapoty na základě charakteru proudění a působícího tlaku kolem vozidla. Tento způsob oproti testování reálných modelů v aerodynamickém tunelu značně sníží náklady a urychlí vývoj tvarových řešení kapoty.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Obecný základ aerodynamiky

Aerodynamika je podoblast fyziky, konkrétně mechaniky tekutin, která se zabývá pohybem plynů kolem pevných těles a působením mezi nimi. Účinky na těleso a jeho obtékání jsou stejné jak v případě pohybu plynu kolem tělesa, tak pohybu tělesa v plynu. Jedná se o princip relativních účinků [1]. Vlastnosti proudění zásadně ovlivňuje plynné prostředí. V případech aerodynamiky se jako plynné prostředí uvažuje vzduch.

2.1.1 Vlastnosti vzduchu

Vzduch patří mezi reálné plyny, které nejsou dokonale stlačitelné a mají nenulovou viskozitu. Mezi nejdůležitější charakteristiky vzduchu při proudění kolem těles patří hustota a viskozita.

Hustota

Hustota udává poměr množství látky a daného objemu. Suchý vzduch má při standardních atmosférických podmínkách ($p = 101,325 \text{ kPa}$ a $T = 288 \text{ K}$) hustotu $1,225 \text{ kg/m}^3$ [2]. Tato hodnota se mění v závislosti na teplotě a nadmořské výšce, což má vliv na výsledné aerodynamické účinky. Při rychlosti vozidla do 400 km/h se však hustota vzduchu na povrchu karoserie nemění a vzduch je považován za nestlačitelný [1].

Viskozita

Viskozita vzduchu určuje vnitřní tření molekul plynu. To znamená, že čím je viskozita plynu vyšší, tím je tělesu při průchodu plynným prostředím kladen větší odpor.

Dynamická viskozita je dána vztahem [3]:

$$\eta = \tau \cdot \frac{dy}{dv} \quad (1)$$

kde τ je tečné napětí vnitřního tření mezi vrstvami laminárního proudění v Pa a dy/dv je gradient rychlosti ve směru kolmém na směr rychlosti proudění v s.

Uvedený vztah však platí jen pro laminární proudění newtonovské tekutiny. Tedy tekutiny mající všechny vektory rychlosti stejný směr, kde rychlost deformace tekutiny je přímo úměrná jejímu napětí. Většina běžných kapalin i plynů se řídí newtonovskými zákony rychlosti deformace a napětí [4].

V některých případech a rovnicích je výhodnější použít kinematickou viskozitu, která je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty tekutiny [3]. Díky tomuto vztahu můžeme jednotlivé viskozity mezi sebou přepočítat v závislosti na tom, kterou známe.

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2)$$

kde v je kinematická viskozita v m^2/s , η dynamická viskozita v $\text{Pa}\cdot\text{s}$ a ρ hustota kapaliny v kg/m^3 .

Viskozita také závisí na teplotě a tlaku. Při běžných podmínkách je vliv tlaku zanedbatelný. S rostoucí teplotou roste viskozita plynů, čímž se liší od kapalin, kde s rostoucí teplotou klesá viskozita [4].

Při nulové nadmořské výšce a $15\text{ }^\circ\text{C}$ má dynamická viskozita suchého vzduchu hodnotu $\eta = 1,789 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a kinematická viskozita $v = 1,461 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ [2].

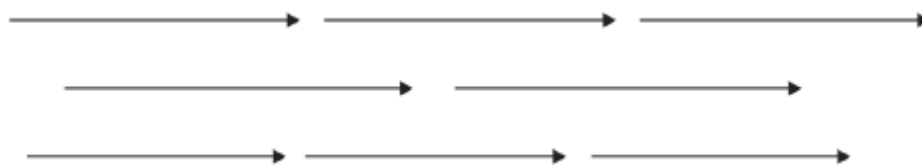
2.1.2 Proudění a jeho typy

Při pohybu částic vzduchu vzniká proudnice, která popisuje trajektorii pohybu dané částice. Pokud se udržuje konstantní rychlost, tak další částice procházející stejným bodem bude mít stejný tvar proudnice. Tečna k proudnici udává okamžitý směr rychlosti v daném bodě. Složením několika proudnic vzniká obraz obtékání tělesa [1].

Reálné plyny důsledkem své viskozity mají dva typy proudění.

Laminární proudění

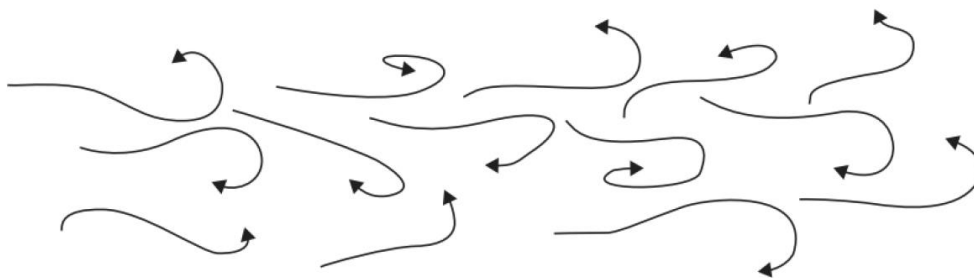
Laminární proudění je charakteristické uspořádaným prouděním, obr. 2-1. Nedochází zde k mísení vrstev proudu a částice vzduchu udržují svůj směr. Toto proudění se vyskytuje při nižších rychlostech [5].



Obr. 2-1 Znárodnění průběhu laminárního proudění [6]

Turbulentní proudění

Turbulentní proudění je naopak neuspořádané. Tvoří se zde víry, při kterých dochází k výměně energie mezi jednotlivými vrstvami proudu plynu, obr. 2-2. Tento typ proudění vzniká při vysokých rychlostech [5].



Obr. 2-2 Znáznornění průběhu turbulentního proudění [6]

O jaké proudění se jedná udává Reynoldsovo číslo. Tomuto číslu se na základě experimentu při stanovených podmínkách určí kritická hodnota. Následně v závislosti na rychlosti proudění se určí Reynoldsovo číslo. Pokud je nižší než jeho kritická hodnota, dochází k laminárnímu proudění, v opačném případě k turbulentnímu [2]. Reynoldsovo číslo se vypočítá vztahem [7]:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad (3)$$

kde v_s je střední hodnota rychlosti proudění tekutiny v m/s, d představuje charakteristický rozměr obtékaného tělesa m. V případě vozidel se jako charakteristický rozměr udává rozvor kol nebo průměr fiktivního kruhu, který má stejný obsah jako čelní plocha automobilu [1]. Posledním členem rovnice ν je kinematická viskozita v m²/s.

U karoserie automobilu v souvislosti s jeho tvarem je velký rozsah rychlostí proudu vzduchu. Z toho vyplývá, že se zde budou vyskytovat oba typy proudění [1].

2.1.3 Rovnice používané v aerodynamice

V aerodynamice platí tři základní rovnice, které se používají při výpočtech proudění plynů.

Rovnice kontinuity

Rovnice popisuje zákon zachování hmotnosti. V podstatě říká, že co do daného objemu vejde to z něj také musí vyjít. Pokud se tedy změní průřez průtočné plochy, tak se musí změnit hustota nebo rychlost proudící tekutiny [7]. Pro stlačitelnou kapalinu platí vztah [7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

kde ρ značí hustotu v kg/m³, t čas v s a \vec{v} vektor rychlosti proudící tekutiny v m/s.

Jak už bylo zmíněno výše, tak lokální hustota plynu u jedoucího automobilu se téměř nemění a vzduch je považován za nestlačitelný, takže se bude zvyšovat rychlost proudění. Tento jev lze pozorovat při vstupu vzduchu pod automobil, kde díky nízké průtočné ploše zvýší svoji rychlost.

Vztah se tedy pro nestlačitelnou tekutinu zjednoduší následovně [7]:

$$Q = S \cdot v = konst. \quad (5)$$

kde Q značí hmotností průtok tekutiny v kg/s, S průtočnou plochu v m² a v rychlost proudění v m/s.

Bernoulliho rovnice

Tato rovnice vychází ze zákona zachování energie a popisuje vztah mezi rychlostí a tlakem tekutiny [8]. Rovnice vyjadřuje, že součet statického a dynamického tlaku je vždy konstantní. Vzduch při svém proudění mění směr a rychlost. Pokud se zvýší rychlost proudění zvýší se dynamický tlak a statický tlak naopak klesá [1]. Obecný vztah Bernoulliho rovnice je [7]:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot h_2 + \int_1^2 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} d\vec{l} \quad (6)$$

kde v značí rychlost proudění v m/s, p tlak tekutiny v Pa, g tíhové zrychlení m/s², h výšku nad hladinou nulové potenciální energie v m. Z energetického hlediska jednotlivé členy pravé strany rovnice zleva znázorňují kinetickou měrnou energii, tlakovou potenciální měrnou energii, tíhovou potenciální měrnou energii a poslední integrální člen představuje měrnou energii potřebnou na změnu rychlostního pole na daném úseku v čase, někdy také tzv. měrná ztrátová energie [7]. Index 1 značí počáteční stav tekutiny a index 2 konečný stav.

V případě aerodynamiky vozidel tíhová potenciální měrná energie a ztrátová energii se může zanedbat a vztah se značně zjednoduší [1].

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = konst. \quad (7)$$

První člen rovnice představuje statický tlak a druhý člen dynamický tlak. Tato rovnice však platí jen pro nevazké tekutiny.

Navier-Stokesova rovnice

Jedná se o parciální diferenciální rovnice, které vycházejí ze zákona zachování hybnosti pro viskózní nestlačitelnou tekutinu. Vyjadřují rovnováhu sil působících na prvek reálné kapaliny [9].

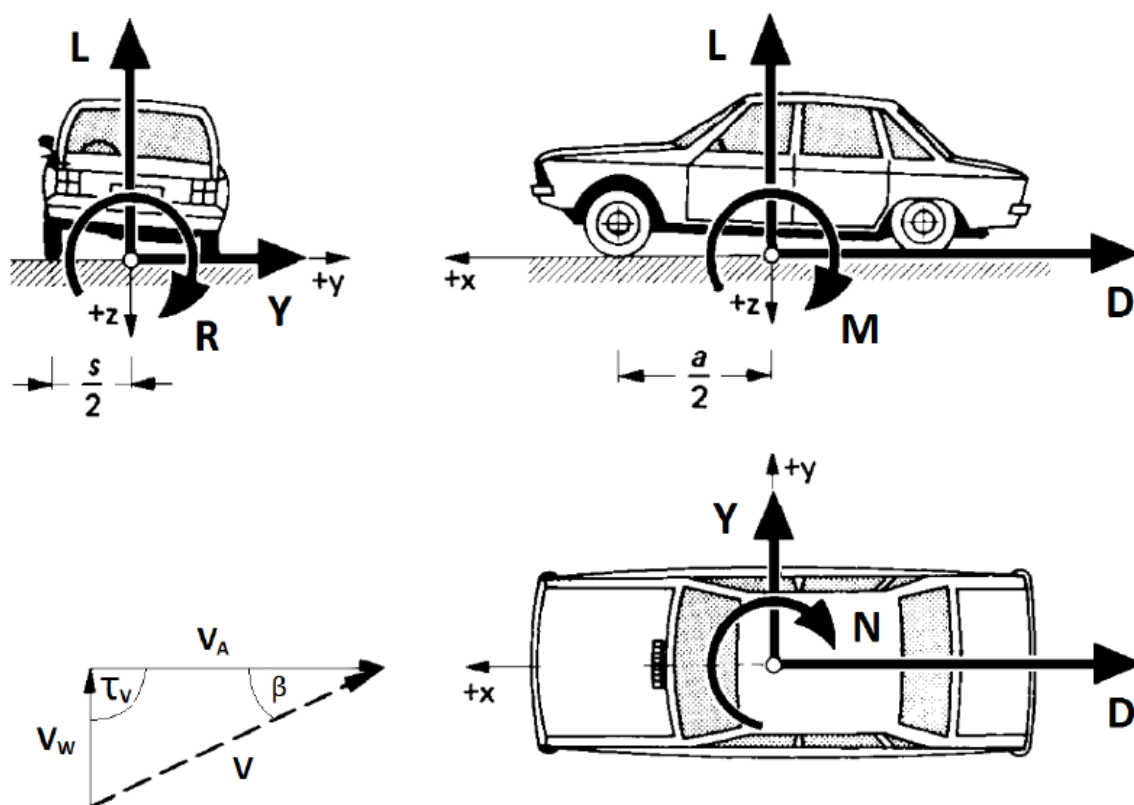
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\text{grad} \vec{v}) \vec{v} = \vec{a} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \Delta \vec{v} \quad (8)$$

Členy rovnice zleva se nazývají lokální zrychlení a konvektivní zrychlení. Pravá strana obsahuje členy vyjadřující zrychlení od vnějších objemových sil, zrychlení od plošných sil a zrychlení od viskózních sil [7].

Navier-Stokesova rovnice má analytické řešení jen v případě jednoduchých toků, a proto se využívá převážně při numerických simulacích. Nalezení analytického řešení této rovnice by znamenal zásadní objev v oblasti mechaniky tekutin. Vyřešení by například pomohlo porozumět turbulencím, a proto patří mezi sedm problémů tisíciletí [9].

2.2 Silové účinky proudícího vzduchu na vozidlo

Při jízdě na vozidlo působí relativní proud vzduchu. Jeho rychlost je definována jako vektorový součet rychlosti vzduchu a záporně vzaté rychlosti vozidla. Účinky relativního proudu vzduchu v prostoru popisují tři silové a tři momentové složky, viz obr. 2-3 [1].



Obr. 2-3 Znázornění působení aerodynamických účinků na vozidlo při jízdě [2]

Aerodynamické síly

Aerodynamický odpor, působí proti směru pohybu vozidla a omezuje ho v jízdě.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot A \cdot \rho \cdot V^2 \quad (9)$$

Aerodynamický vztlak, síla působící kolmo ke směru pohybu automobilu.

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \cdot A \cdot \rho \cdot V^2 \quad (10)$$

Aerodynamická boční síla, je silový účinek vznikající při bočním proudění působící kolmo vzhledem k aerodynamickému odporu a vztlaku.

$$F_Y = \frac{1}{2} C_Y \cdot A \cdot \rho \cdot V^2 \quad (11)$$

Aerodynamické momenty:

Klopivý moment, natáčí vozidlo kolem osy ve směru aerodynamického odporu

$$M_R = \frac{1}{2} C_R \cdot A \cdot l \cdot \rho \cdot V^2 \quad (12)$$

Klonivý moment, působí kolem osy ve směru aerodynamické boční síly.

$$M_M = \frac{1}{2} C_M \cdot A \cdot l \cdot \rho \cdot V^2 \quad (13)$$

Zatáčivý moment, stačí vozidlo působením ve směru aerodynamické vztlakové síly.

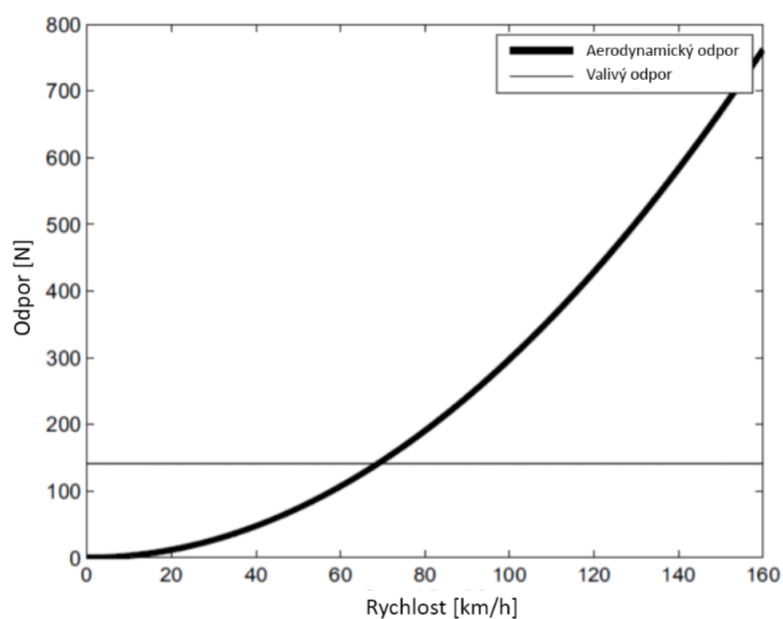
$$M_N = \frac{1}{2} C_N \cdot A \cdot l \cdot \rho \cdot V^2 \quad (14)$$

V rovnicích vystupují bezrozměrné aerodynamické koeficienty C_D , C_L , C_Y , C_R , C_M , C_N , které jsou závislé na tvaru karosérie, hustota ρ v kg/m^3 , rychlost proudění a vozidla V v m/s a charakteristické rozměry A , l . A znázorňuje obsah čelní plochy v m^2 vozidla a l rozvor automobilu v m [1].

2.2.1 Aerodynamický odpor

Ze všech silových účinků je právě aerodynamický odpor nejdůležitější. Při jízdě vozidla nabývá významnosti především při vyšších rychlostech. S rostoucí rychlostí roste odpor vzduchu exponenciálně a při rychlostech mezi 65–80 km/h v závislosti na druhu vozidla převažuje nad odporem valivým [1].

Obr. 2-4 ukazuje průběh velikosti aerodynamického odporu osobního vozidla a valivého odporu v závislosti na rychlosti vozidla.



Obr. 2-4 Průběh odporů při jízdě vozidla [10]

V tab. 2-1 jsou zobrazeny tvary základních těles a jejich hodnoty dosahovaného koeficientu aerodynamického odporu.

Tab. 2-1 Koeficienty aerodynamického odporu základních těles [6] upraveno

Tvar	Nákres situace proudění	c_D
Kruhová deska		1,17
Koule		0,47
Polokoule		0,42
Kužel 60°		0,50
Krychle		1,05
Krychle		0,80
Válec $L/D > 2$		0,82
Proudnicový tvar		0,04
Poloviční proudnicový tvar na zemi		0,09

Rozdělení aerodynamického odporu

Aerodynamický odpor se dělí do několika kategorií [1]:

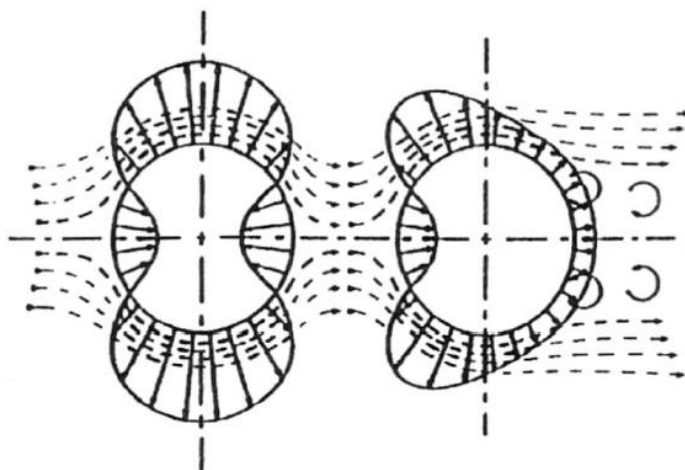
- tvarový odpor
 - tlakový – tvoří 50 až 80 % celkového odporu
 - třecí – 5 až 10 %
- indukovaný odpor způsobený aerodynamickým vztlakem – 3 až 10 %
- odpor vznikající mezi základním tvarem a detaily karoserie – 10 až 20 %
- odpor rotujících kol – 5 %
- odpor vznikající průchodem vzduchu systémem HVAC – 10 až 20 %

Třecí aerodynamický odpor

Odpor vznikající v důsledku tření částic vzduchu o povrch karosérie. Velikost třecího odporu závisí na vlastnostech proudícího plynu a drsnosti obtékaného povrchu. S třecím odporem přímo souvisí mezní vrstva, která tvoří významnou roli v celkovém odporu.

Tlakový aerodynamický odpor

Tlakový odpor je dán součtem tlakových sil působících na vozidlo. V ideálním nevazkém prostředí je součet tlakových sil nulový a na těleso nepůsobí žádný odpor. Ve skutečném vazkém prostředí dochází k odtržení proudů vzduchu od povrchu tělesa, tím vzniká za tělesem podtlak, protože vzduch nepronikne až k zadní straně tělesa. Tento jev je označován jako úplav. Součtem tlaku proudů vzduchu a vzniklého podtlaku za tělesem působících proti pohybu tělesa vzniká aerodynamický odpor [1].



Obr. 2-5 Rozložení tlaků na válci ve nevazkém a vazkém prostředí [1]

Obr. 2-5 ukazuje rozložení tlaku na válci ve volném prostoru. Situace nalevo znázorňuje ideální prostředí a napravo skutečné prostředí.

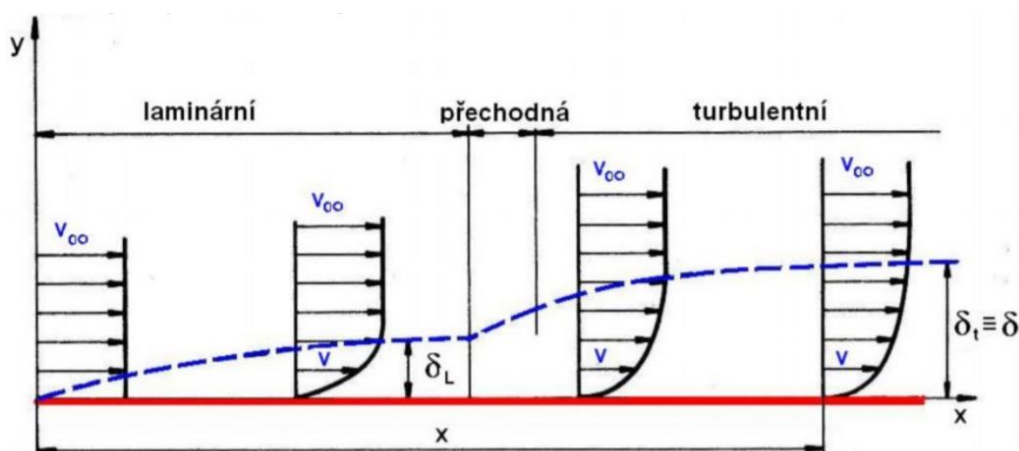
Tlakové rozložení ovlivňuje mnoho faktorů, nejzásadnější je však mezní vrstva [1]. U vozidel je situace ještě složitější, protože dochází k interakci vzduchu mezi vozidlem a vozovkou a tím jsou ovlivněny další aerodynamické silové účinky.

Mezní vrstva

Při proudění skutečné vazké tekutiny kolem tělesa, vzniká na jeho povrchu mezní vrstva, která je příčinou tření vzduchu s povrchem tělesa. Rychlost proudění v mezní vrstvě se mění od povrchu tělesa, kde je nulová, a postupně s každou vrstvou se zvyšuje až po okraj mezní vrstvy, kde má stejnou rychlost jako okolní vzduch [1]. Rychlost jednotlivých vrstev vzduchu v mezní vrstvě tvoří rychlostí profil a souvisí s vnitřním třením částic, tudíž s vazkostí.

Podle typu proudění v mezní vrstvě rozeznáváme laminární a turbulentní mezní vrstvu. Výskyt konkrétního typu mezní vrstvy závisí na místních rychlostech proudění. Při nízkých rychlostech vzniká laminární mezní vrstva, která se u vozidel nachází převážně na přední části [1]. Se zvyšující rychlostí se mění laminární mezní vrstva na turbulentní, kde dochází k vířivému proudění. Turbulentní mezní vrstva je větší a díky vyšším rychlostem narůstá třecí odpor.

Kritickou hodnotu mezi laminární a turbulentní mezní vrstvou udává Reynoldsovo číslo. Přechod mezi jednotlivými typy nastává přibližně kolem hodnoty $Re = 5 \cdot 10^5$ v případě ploché desky v závislosti na drsnosti povrchu [2].

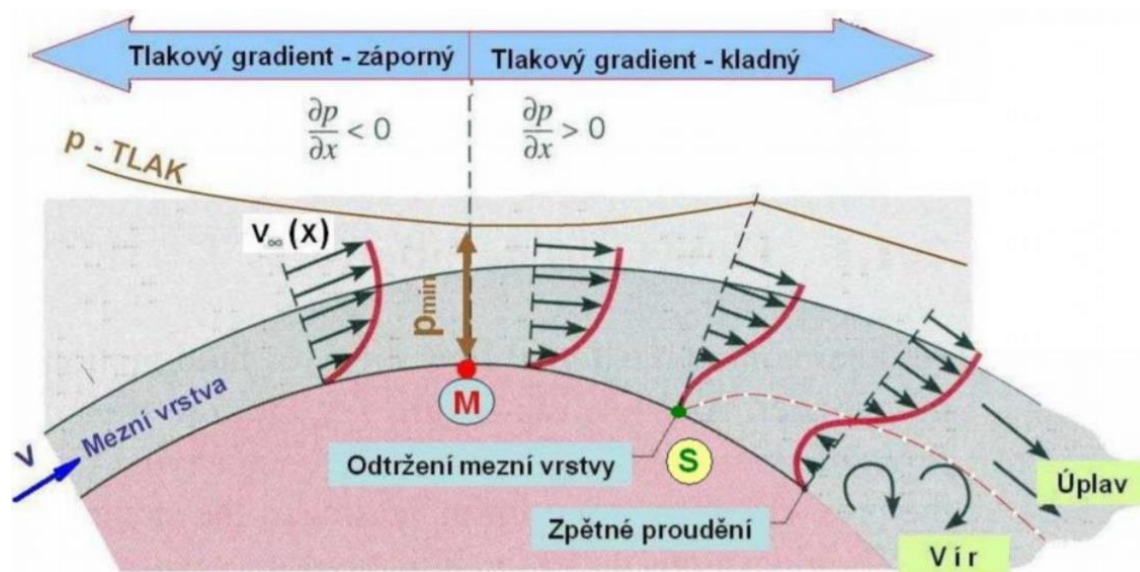


Obr. 2-6 Výška a rychlostních profily laminární a turbulentní mezní vrstvy [11]

Održení proudu vzduchu

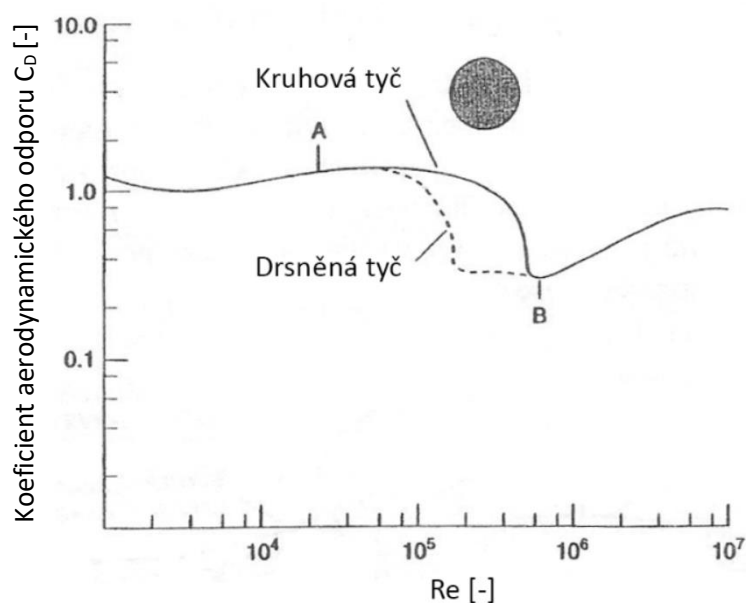
V důsledku vazkosti plynu dochází k odtržení mezní vrstvy od povrchu tělesa. V jakém místě k odtržení dojde závisí na rychlosti proudění, drsnosti povrchu, tlakovém gradientu a typu mezní vrstvy. U osobních automobilů dochází k odtržení nejčastěji v místě blízkém za maximálním příčným průřezem. V přední části vozidla vzduch zrychluje, klesá statický tlak, roste dynamický tlak a tlakový spád je záporný. V místě maximálního příčného průřezu vozidla vzduch začíná zpomalovat, zvyšuje se statický tlak, klesá dynamický tlak a tlakový

spád je kladný. Díky tomuto jevu vzduch nemá již dostatek kinetické energie na proudění po povrchu a dochází k nežádoucímu odtržení proudu vzduchu od karoserie a vzniku úplavu za vozidlem. K odtržení mezní vrstvy vzduchu dochází také na lokálních místech karoserie, např. u přechodu kapoty a čelního skla, na zpětných zrcátkách atd [1].



Obr. 2-7 Průběhu a odtržení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [11]

U laminární mezní vrstvy dochází k odtržení dříve, vzniká větší úplav, větší podtlak a tím pádem větší odpor. Naproti tomu u turbulentní mezní vrstvy dochází k odtržení díky víření a vyšší kinetické energii později [1]. Proud kopíruje profil automobilu, tvoří se menší úplav a podtlak, tím dochází ke snížení tvarového aerodynamického odporu, avšak samotná turbulentní mezní vrstva má vyšší aerodynamický odpor z důvodu většího tření.

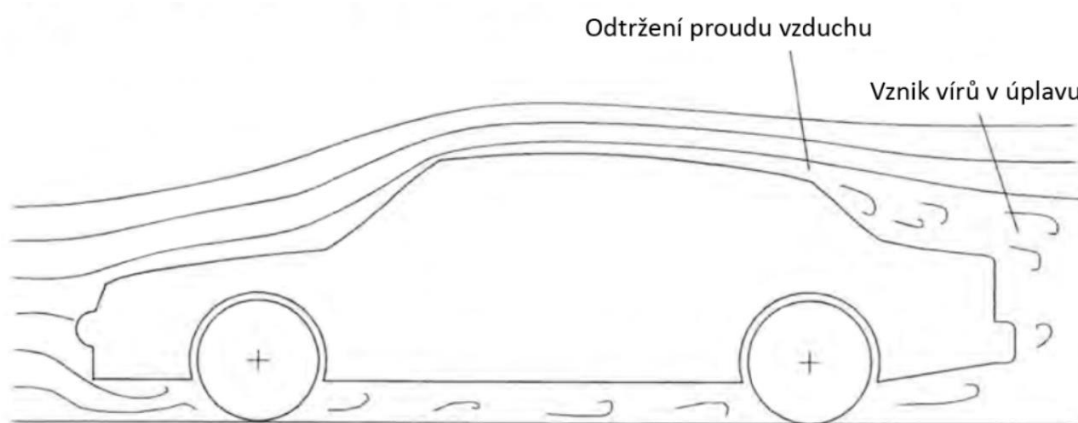


Obr. 2-8 Vliv změny mezní vrstvy na koeficient aerodynamického odporu kruhové tyče [1]

Z obr. 2-8 je patrné, že při přechodu laminární mezní vrstvy na turbulentní rychle klesne koeficient aerodynamického odporu a postupně se zvyšující se rychlostí znovu roste.

Úplav za vozidlem

Úplav je tvořen vířivým prouděním za vozidlem a podtlakem, který působí proti pohybu vozidla, obr. 2-9. Rozhodujícím faktorem velikosti úplavu je tvar zadní části karoserie, která ovlivňuje rychlost proudění a místo odtržení proudu vzduchu na zádi automobilu.



Obr. 2-9 Održení proudu vzduchu a vznik úplavu za vozidlem [12]

Indukovaný odpor způsobený aerodynamickým vztlakem

Během pohybu vozidla dochází k rozdělení proudu vzduchu na tři hlavní větve. Jedna jde horní částí karoserie, druhá proudí pod vozidlo a třetí proudí kolem bočnic. Na začátku mezery mezi vozidlem a vozovkou dochází k urychlování proudu vzduchu, jako na horní straně karoserie. Vlivem vazkosti vzduchu se tvoří mezní vrstva na podvozku vozidla a povrchu vozovky. Dochází ke zpomalení proudění a v určité vzdálenosti od náběžné hrany karoserie, v závislosti na světlé výšce vozidla, se jednotlivé mezní vrstvy spojí a splynou s úplavem, kde dochází k turbulentním vírům, jak je zobrazeno na obr. 2-9 [1].

Nízká rychlost proudění má za následek zvýšení statického tlaku, který má tendenci přemístění do oblasti nižšího statického tlaku. Ten se nachází na horním a bočním povrchu karoserie, kde je vysoká rychlost proudění. Dochází k přesunu vzduchu z podvozku vozidla na boční strany karoserie a tím dochází ke vzniku vířivého proudění. Tyto odtokové či boční víry proudí po bocích karoserie k zadní části vozidla, kde jsou pohlceny úplavem. Tím dochází ke snížení statického tlaku za vozidlem a zvýšení aerodynamického odporu. Velikost bočních vírů je závislá na tvaru karoserie. Tvar také ovlivňuje rozdíl tlaků na horní a spodní části vozidla, který je přímo úměrný rychlosti vozidla [1].

Vlivem bočních odtokových vírů dochází k odklonění svislé osy vztlačkové síly o malý úhel směrem dozadu, z čehož se dá odvodit vztah určující velikost indukovaného aerodynamického odporu [1]. Proto se tento odpor nazývá jako odpor indukovaný vztlačkovou silou.

$$D_i = F_L \cdot \sin \varepsilon = k \cdot F_L \quad (15)$$

F_L představuje vztlakovou sílu v N, $\sin \varepsilon$ je úhel odklonění vztlakové síly ve °. Tento úhel se nahrazuje konstantou k , která u běžných osobních automobilů dosahuje hodnoty $k = 0,36$ [-] [1].

Odpor z interferenčních účinků základního tvaru a detailů karoserie

Prouděním kolem tvarově složitých prvků nebo mezi více tělesy dochází k interakci mezi jednotlivými tělesy a ovlivnění výsledného obrazu obtékání. Příkladem interakce proudění kolem těles mohou být dvě ploché kruhové desky umístěny za sebou. Při obtékání desek existuje optimální vzdálenost mezi nimi pro minimální aerodynamický odpor, který je menší než odpor jedné desky [1].

U automobilů k interakci dochází například mezi karoserií a zpětnými zrcátky, kdy odpor vozidla se zrcátky je vyšší než součet odporů samotné karoserie a samotných zrcátek. K další cílené interferenci dochází u přídatných aerodynamických prvků vozidel. Samotný předový spoiler má velký aerodynamický odpor, ale při spojení s karoserií příznivě ovlivňuje proudění kolem vozidla. Tím nejen snižuje aerodynamický odpor, ale také pozitivně ovlivňuje další aerodynamické silové účinky [1].

Díky tomuto jevu lze dosáhnout vhodným tvarováním karoserie a přídatnými prvky optimálních jízdních vlastností vozidla. Dnešní automobily jsou většinou konstrukčně a tvarově velmi složité, a přesto právě interakcí jednotlivých prvků dosahují nejen nižšího aerodynamického odporu než historické proudnicové tvary vozidel, ale také velmi dobré stability.

Odpor rotujících kol

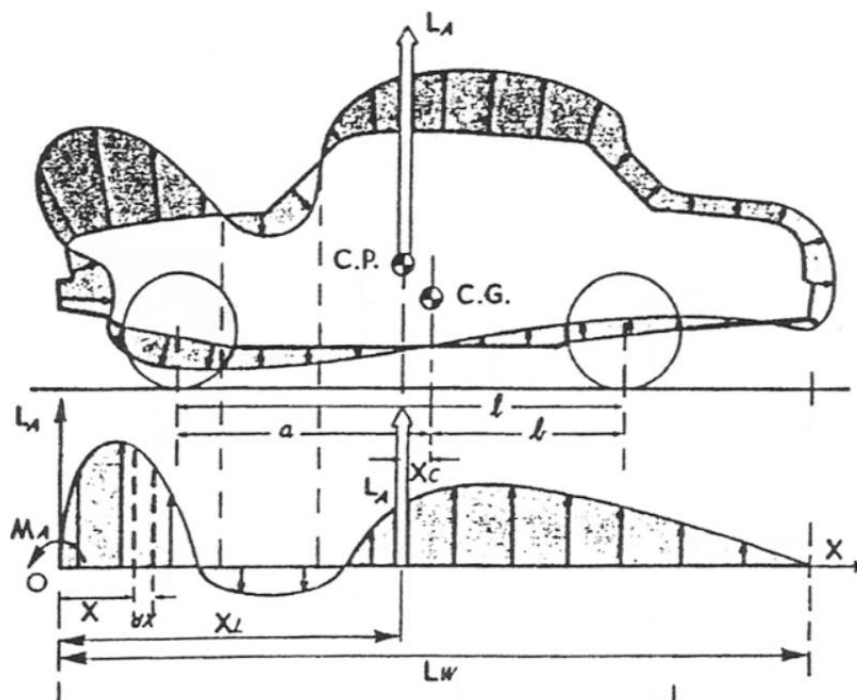
Vlivem velké rychlosti rotujících kol dochází k brzkému odtržení proudu vzduchu od povrchu pneumatiky. Tím dochází ke vzniku úplavu a turbulentnímu proudění za koly a kolem bočních stran karoserie, což má za následek zvýšení odporu a také vztlaku [1]. Významnou roli hraje také tvar disku kola. Pro co nejnižší odpor je vhodný plný disk, ale kvůli potřebě chladit brzdy a snížení hmotnosti se vyrábí disky s otvory.

Odpor vzniklý průchodem HVAC systémem

Při provozu automobilu vzniká v oblasti motoru a brzd velké množství tepla, které je potřeba chladit. K tomuto účelu se využívá proudící vzduch, který se přivádí do ústrojí vozidla k ochlazení součástí, ale také prostoru pro posádku. U sportovních automobilů se vytváří sofistikované kanály pro maximální ochlazovací účinnost a minimální vliv na aerodynamický odpor.

2.2.2 Aerodynamický vztlak

Proud vzduchu obtékající povrch automobilu se rozděluje na několik směrů kopírující tvar vozidla. Části vzduchu se po rozdělení musí zase spojit, tzn. proud vzduchu obtékající horní část automobilu v důsledku tvaru karoserie musí za stejný časový úsek urazit delší dráhu než proud vzduchu ve spodní části karoserie. Horní proud zrychluje, snižuje statický tlak a vzniká podtlak. Naopak spodní proud zpomaluje a zvyšuje se statický tlak. Výsledkem je vznik kladné vztlakové síly, která míří kolmo vzhůru vzhledem ke směru pohybu vozidla [1]. Rozložení tlaků po povrchu karoserie vozidla je zobrazeno na obr. 2-10.



Obr. 2-10 Rozložení tlaků na povrchu karoserie při jízdě automobilu [1]

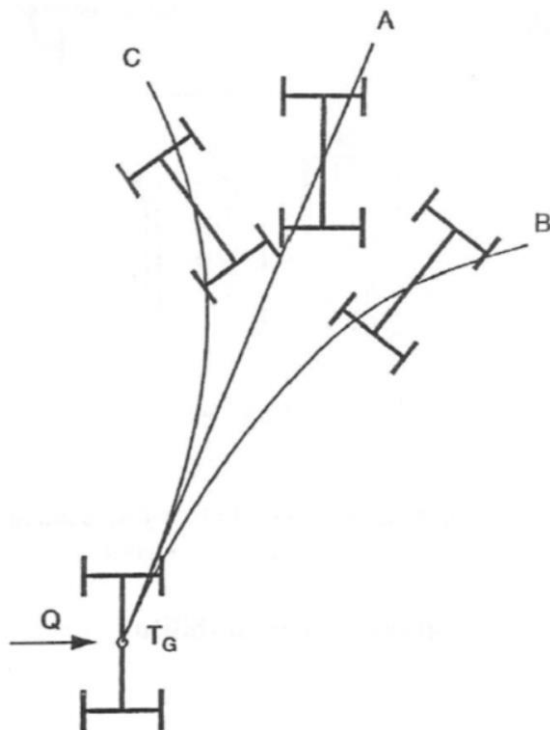
Důvodem pomalejšího proudu vzduchu pod vozidlem není jen tvar vozidla, ale také vznik mezní vrstvy mezi podvozkem a vozovkou, která ho zpomaluje. Proto se některé automobily vybavují přídatnými prvky, které zvyšují rychlost proudění na podvozku nebo usměrňují proud vzduchu kolem vozidla, pro dosažení minimální či záporné vztlakové síly.

Příliš velká vztlaková síla je nežádoucí, protože nadlehčuje vozidlo, tím snižuje kontakt automobilu s vozovkou, což má negativní dopad na stabilitu jízdy a přenášenou hnací sílu kol vozidla na silnici.

2.2.3 Aerodynamická boční síla a momenty

Aerodynamická boční síla a momentové účinky nabývají důležitosti při vyšších rychlostech a bočním proudění vzduchu. Tyto síly a momenty mají hlavně vliv na stabilitu vozidla.

Při působení bočního větru dochází ke stáčení vozidla podle obr. 2-11. Pokud působí síla před těžištěm automobilu, vozidlo se stáčí ve směru působení větru a je aerodynamicky nestabilní. V opačném případě je aerodynamicky stabilní, protože dochází ke stáčení vozidla proti působení větru. Posledním méně častým případem, kdy působí síla bočního větru v těžišti vozidla, je automobil aerodynamicky neutrální [1].



Obr. 2-11 Vliv působení boční síly na stabilitu vozidla [1]

Karoserie se zaoblenými boky a splývavou zádí typu fastback mají menší součinitel boční síly než karoserie typu combi s hranatými boky. U součinitele zatáčivého momentu jsou hodnoty z hlediska typu karoserie naopak. Součtem všech aerodynamických účinků, včetně vztlakové síly, která má velký vliv na stabilitu vyplývá, že nejvýhodněji z hlediska aerodynamické stability se jeví karoserie typu combi [1].

Osobní automobily jsou většinou aerodynamicky nestabilní. Všeobecně však nelze podle účinků aerodynamických sil a momentů posoudit, jestli bude vozidlo stabilní nebo nestabilní. K tomu je potřeba brát v úvahu komplexní dynamiku vozidla zahrnující mnoho faktorů [1].

2.3 Vliv tvaru karoserie na velikost odporu a vzlaku

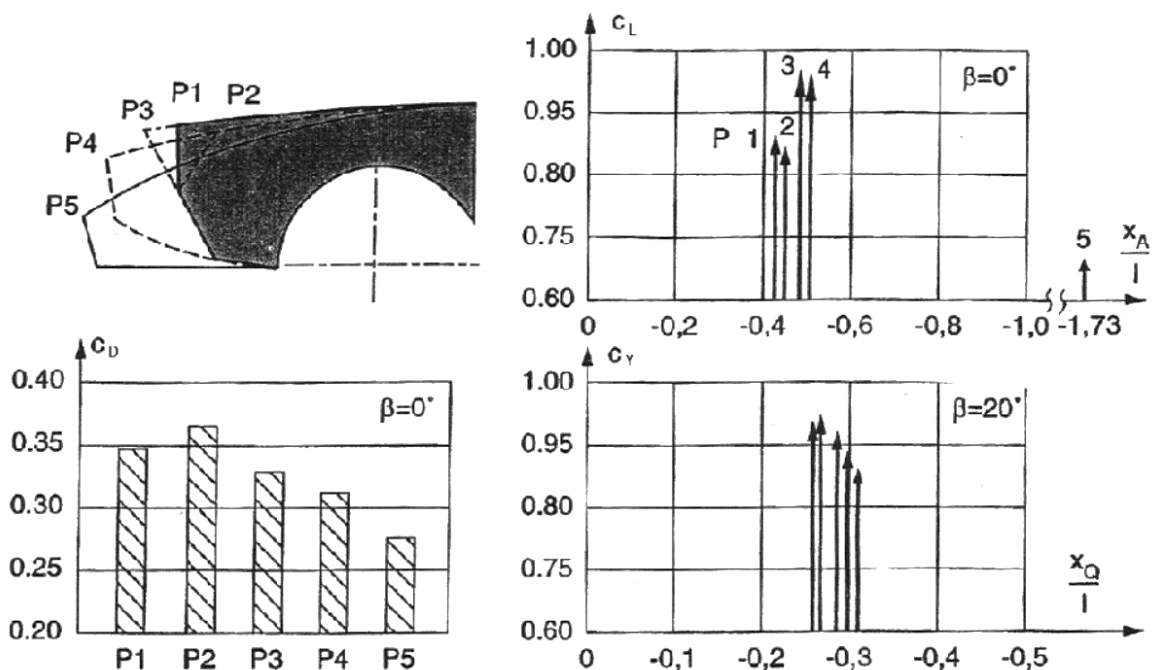
V této kapitole se budeme zabývat převážně aerodynamickými konstrukčními prvky na osobních automobilech, protože dobře reprezentují principy optimální aerodynamické karosérie většiny vozidel.

Obecně se při návrhu karoserie vozidla požadují co nejnižší hodnoty součinitele odporové a vztahové síly. Jednotlivé konstrukční prvky však mnohdy zlepšují jednu charakteristiku, ale naopak zhorší druhou. Proto nalezení vhodné kombinace parametrů také s ohledem na design je velmi složitý úkol.

2.3.1 Přední část

V přední části má nejzásadnější vliv na celkové obtékání vozu poloha náběžné hrany, podle níž se rozděluje vzduch na již zmíněné tři hlavní proudy. Jeden proud jde horní částí karoserie, druhý po bocích a třetí proudí pod vozidlo. Z hlediska aerodynamického odporu se nejlépe jeví nižší poloha náběžné hrany, zaoblené hrany a plynulý přechod mezi kapotou a podvozkem vozidla. Se zvyšující se náběžnou hranou od vozovky naopak klesá součinitel vztahové síly díky rychlejšímu proudění pod vozidlem. Nejvýhodnějších odporových a vztahových vlastností dosahuje velmi nízká náběžná hrana, pomalu stoupající směrem k čelnímu oknu, s plochým podvozkem [1] [13]. Tohoto tvaru se využívá především u sportovních vozidel, které mají motor umístěn v zadní části. U osobních vozidel tento tvar není vhodný z hlediska nízkého prostoru pro motor, který se obvykle nachází v přední části. Srovnání jednotlivých tvarů přídělí a její vlivy na aerodynamické účinky lze vidět na obr. 2-12.

V místě přechodu kapoty a čelního skla dochází vlivem ostré změny tvaru k odtrhávání části proudu vzduchu a vířivému proudění. Toto turbulentní proudění je následně strháváno do stran a po bocích automobilu proudí až k zádi, kde splyne s úplavem, čímž se zvyšuje odpor [1]. Tento jev lze minimalizovat plynulejším přechodem mezi kapotou a čelním sklem.

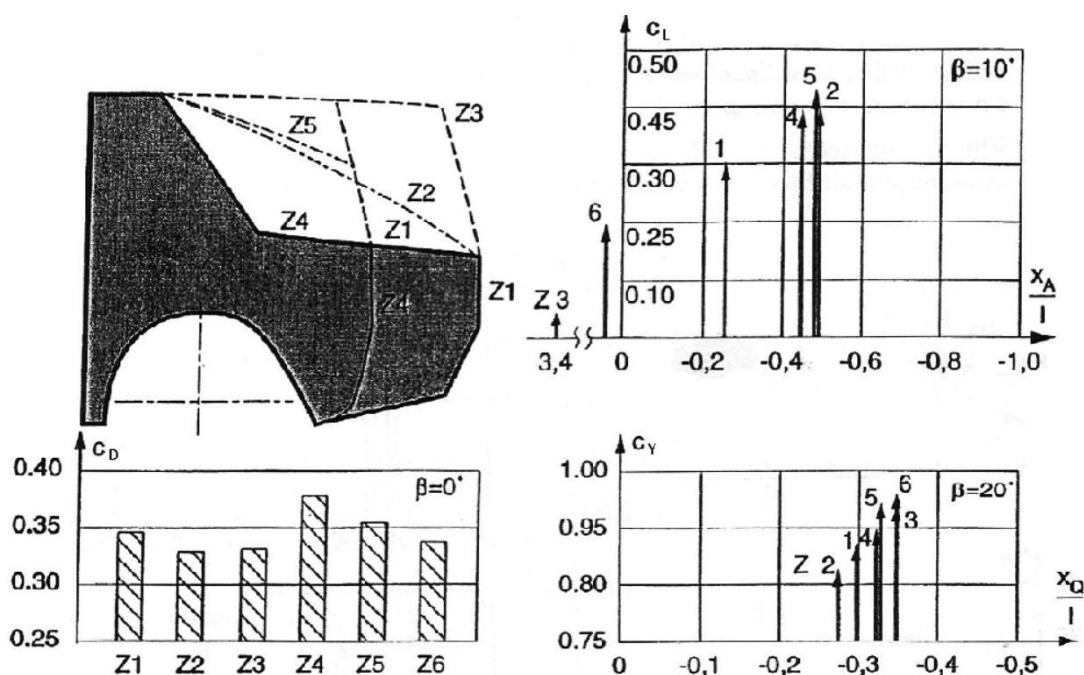


Obr. 2-12 Vliv polohy náběžné hrany na aerodynamické součinitele [1]

2.3.2 Zadní část

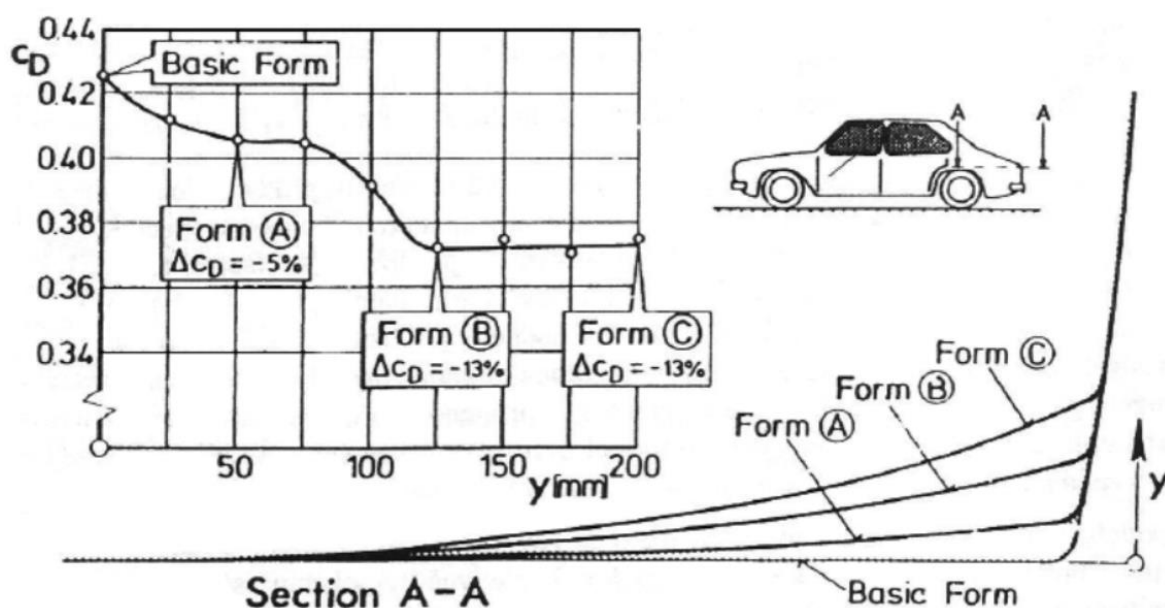
Proudění kolem zádě vozidla je ovlivněno obtékáním kolem přídě, bocích a střechy vozidla. Proto obecně nelze zcela definovat nejvhodnější konstrukční řešení zadní části a musí se brát v úvahu celkové obtékání individuálně pro každé vozidlo. Aerodynamický odpor v zadní části vzniká odtržením mezní vrstvy a vznikem úplavu. Dle realizovaných testů dosahuje nejnižšího odporu splývající, mírně se svažující zád' směrem k vozovce, kde se udržuje hladké proudění o vysoké rychlosti, a ke vzniku úplavu dochází až na samém konci karoserie. O něco vyšší, ale také nízký odpor mají prodloužené zádě typu combi. Karoserie typu sedan, hatchback a SUV dosahují vyššího odporu, viz obr. 2-13. Nejzásadnější vliv na hodnotu součinitele aerodynamického odporu má úhel sklonu zádě. V závislosti na obtékání přídě existuje kritická hodnota úhlu sklonu zadní části, při které vozidlo dosahuje nejvyššího součinitele aerodynamického odporu. To je způsobeno tím, že není zcela definováno místo odtržení mezní vrstvy a odtržení osciluje mezi střechou a horní částí zadního čela [1]. U karoserie typu combi, i přesto že vzniká velký úplav, se dosahuje nízkého odporu a vztlaku, protože má přesně definované místo odtržení mezní vrstvy na konci střechy.

Splývající zád' mírně klesající až k vozovce je nejvhodnější z hlediska odporu, ale na druhou stranu vzduch opouštějící povrch na konci karoserie ve směru mírně klesající zádě proudí zpět pod vozidlo, čímž vzniká vztaková síla [1]. Z toho důvodu se na konec zadní části přidává zád'ový spoiler, který usměrní proudění a přesně definuje odtržení mezní vrstvy, což mírně zhorší odpor, ale zásadně sníží vztakovou sílu, která má vliv na stabilitu vozu. Pokud zád' klesá pod vyšším úhlem, kde není přesně definováno místo vzniku úplavu, naopak přidavný zád'ový spoiler sníží odpor, protože přesně definuje místo odtržení mezní vrstvy a také sníží vztakovou sílu.



Obr. 2-13 Vliv tvaru zadní části vozidla na aerodynamické součinitele [1]

Obr. 2-14 ukazuje vliv půdorysného zakřivení zádě na velikost součinitele aerodynamického odporu. Z obrázku je patrné, že úhel zakřivení zlepší aerodynamické vlastnosti, ale po dosažení určité hodnoty se již se zvyšujícím zakřivením odpor nemění, protože došlo k odtržení mezní vrstvy v určitém místě a vzduch již neproudí po povrchu vozidla.

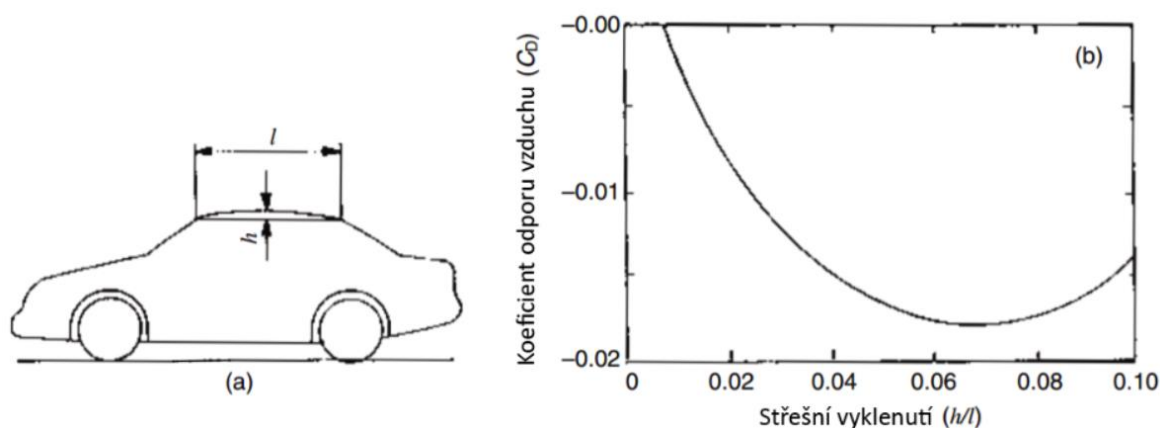


Obr. 2-14 Vliv půdorysného zakřivení zádě na součinitel aerodynamického odporu [1]

2.3.3 Střední část

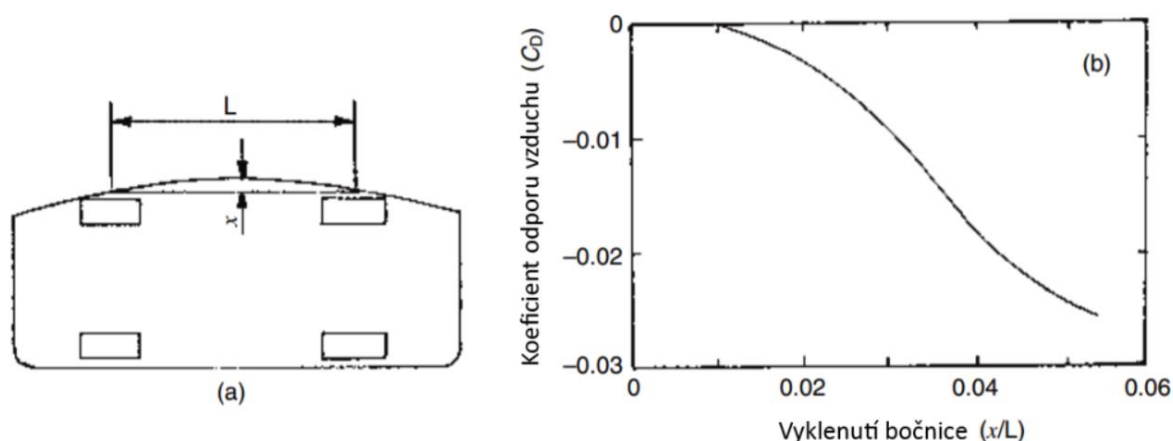
Střední část vozidla je tvořena střechou a boky automobilu. Nižších odporů se dosahuje při vypouknutí střechy a bočnic karoserie.

Vhodné vyklenutí střechy udává poměr výšky oblouku tvořící profil střechy k její délce, což lze vidět na obr. 2-15. Součinitel aerodynamického odporu klesá do hodnoty poměru asi 0,07 a potom zase roste.



Obr. 2-15 Vliv oblé střechy na aerodynamický koeficient odporu [14]

Stejně vlastnosti jako u střechy se aplikuje na bočnice karoserie, kde s rostoucím poměrem výšky půdorysného oblouku bočnice k její délce klesá součinitel aerodynamického odporu.



Obr. 2-16 Vliv zaoblení bočnic automobilu na koeficient aerodynamického odporu [14]

Z výše uvedených vlastností se snižuje součinitel aerodynamického odporu, ale ze vztahu pro aerodynamickou odporovou sílu platí, že se rostoucí čelní plochou tělesa roste také odpor. Proto vyklenutí střechy a bočnic karoserie by neměly příliš ovlivnit výslednou čelní plochu vozidla. Je potřeba zohlednit oba členy rovnice a dosáhnout optimálního poměru.

2.3.4 Podvozek

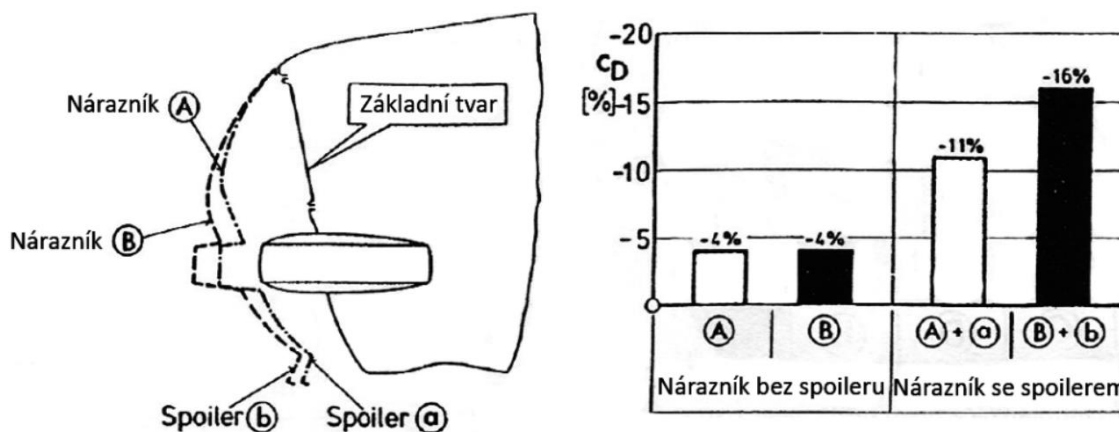
Podvozek hraje důležitou roli především u vztlaku. Jak už bylo zmíněno, mezi podvozkem a vozovkou vzniká mezní vrstva, která zpomaluje proudění, zvyšuje tlak a vzniká kladná vztlaková síla. Při vstupu vzduchu mezi podvozek a vozovku se zužuje průtočná plocha a dochází ke zrychlení proudění, což má pozitivní dopad na snížení tlaku. V zadní části již dochází ke zpomalení vlivem mezní vrstvy a zvýšení tlaku, to navíc indukuje odpor v důsledku přesunutí vírů z podvozků na boky vozidla [1]. Minimalizovat zpomalení a turbulentní proudění v zadní části podvozků lze nejčastěji plochým podvozkem s přídatnými prvky. Všeobecně by se zadní část podvozků neměla zužovat, ale spíše rozšiřovat. K tomuto účelu se nejčastěji používá zadní difuzor.

2.4 Přídatné aerodynamické prvky vozidel

Pro dosažení optimálních vlastností obtékání proudů vzduchu kolem celého vozidla se na karoserii přidávají specifické aerodynamické prvky.

2.4.1 Přední spoiler

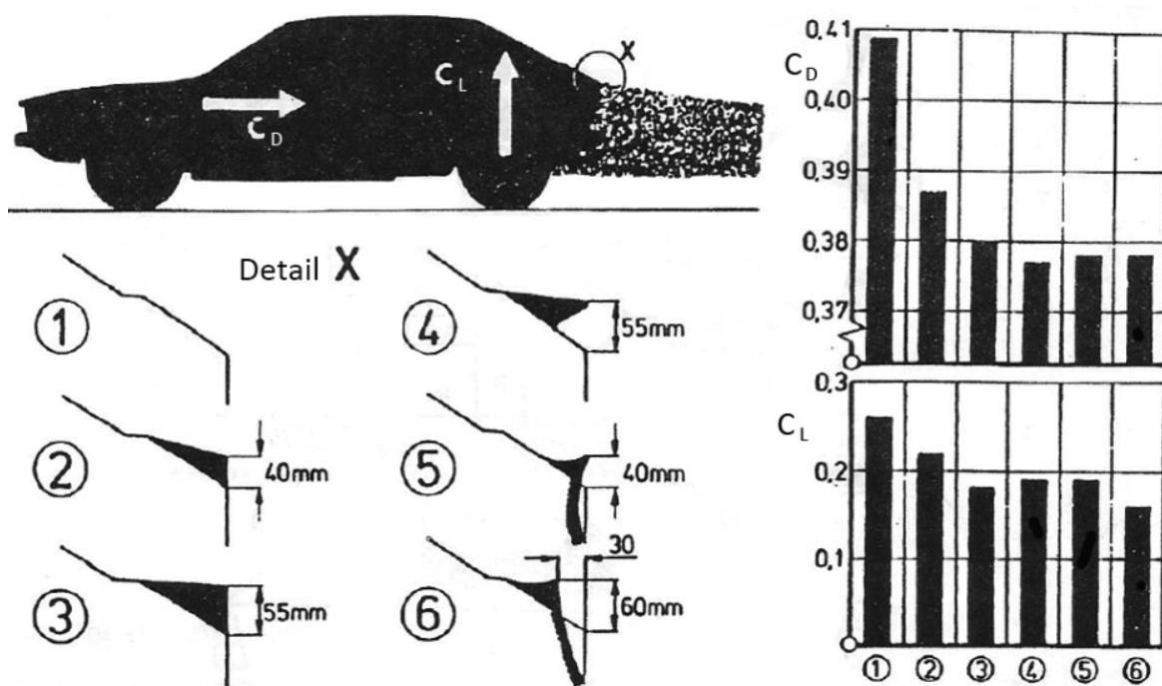
Přední spoiler je součástí nejrůznějších tvarů zvětšující plochu přídě vozidla. Umísťuje se na spodní část předního nárazníku. Díky tomu dojde k zúžení prostoru mezi podvozkem a vozovkou, tím se urychluje vzduch pod přední nápravou a snižuje vztlačková síla. Svým tvarem usměrňuje proud vzduchu kolem vozu a vzájemnou interakcí s dalšími prvky může také příznivě ovlivňovat proudění kolem karoserie a tím snížit celkový aerodynamický odpor vozidla [13] [1], což lze vidět na obr. 2-17.



Obr. 2-17 Vliv změny tvaru přídě a předního spoileru na výsledný aerodynamický odpor [1] upraveno

2.4.2 Zadní spoiler

Zadní spoilery se mohou využívat jak pro snížení aerodynamického odporu, tak pro snížení vztlačkové síly. Existují dva základní typy zadních spoilerů. První je spojen s karosérií vozidla nebo umístěn v její těsné blízkosti. Tento typ se využívá k určení místa odtržení mezní vrstvy a tím snížení aerodynamického odporu. Navíc díky odklonu směru proudění od vozovky snižuje vztlačkovou sílu na zadní nápravě [1]. Vliv tohoto druhu spoileru na aerodynamické účinky zobrazuje obr. 2-18. Druhým typem záďového spoileru je tzv. automobilové křídlo, které má obrácený tvar leteckého křídla. Automobilové křídlo slouží hlavně pro generování záporné vztlačkové síly, tedy přítlaku. Umísťuje se v určité vzdálenosti od karoserie vozidla, kvůli dostatečnému proudění ve spodní části křídla. Vysunutím křídla nad povrch karoserie vzniká překážka pro proudící vzduch a dochází ke zvýšení odporu [15]. Proto se tento typ využívá hlavně u závodních vozidel, kde je potřeba velký přítlak vozu pro rychlý průjezd zatáčkami a dobrou stabilitu. U osobních vozidel se využívá méně, kvůli zvýšení odporové síly.



Obr. 2-18 Změna aerodynamických sil vyvolaná přidavným zadním spoilerem [1]

2.4.3 Boční spoilery

Boční spoilery se přidávají v úrovni podvozku na bočnice vozidla mezi přední a zadní kola. Jedná se o prvek, který většinou ostrou hranou odděluje podvozek od boků automobilu. Slouží především k omezení proudění vzduchu z podvozku na bočnice. Tím zamezí vzniku turbulentního proudění na bočnicích způsobující odpor.



Obr. 2-19 Jedno z možných řešení bočního spoileru [16] upraveno

2.4.4 Deflektor

Jedná se o přídavný prvek, který usměrňuje proudění vzduchu. Není přesně definovaný tvar ani poloha umístění. Deflektory se využívají na střeše nákladních vozidle pro snížení odporu návěsu, ale také u kabrioletů a otevřených vozů. U kabrioletu se na horní část čelního skla umístí rovný prvek, který prodlouží čelní sklo. Proudící vzduch se díky tomu přenes přes celý vůz a nedochází k nežádoucímu zpětnému proudění do kabiny vozu [17].

Deflektory samy o sobě zvyšují odpor, ale díky usměrnění a interakci proudění s jinými prvky mohou naopak celkový aerodynamický odpor vozidla snížit. Vždy záleží na konkrétní situaci.

2.4.5 Generátory vírů

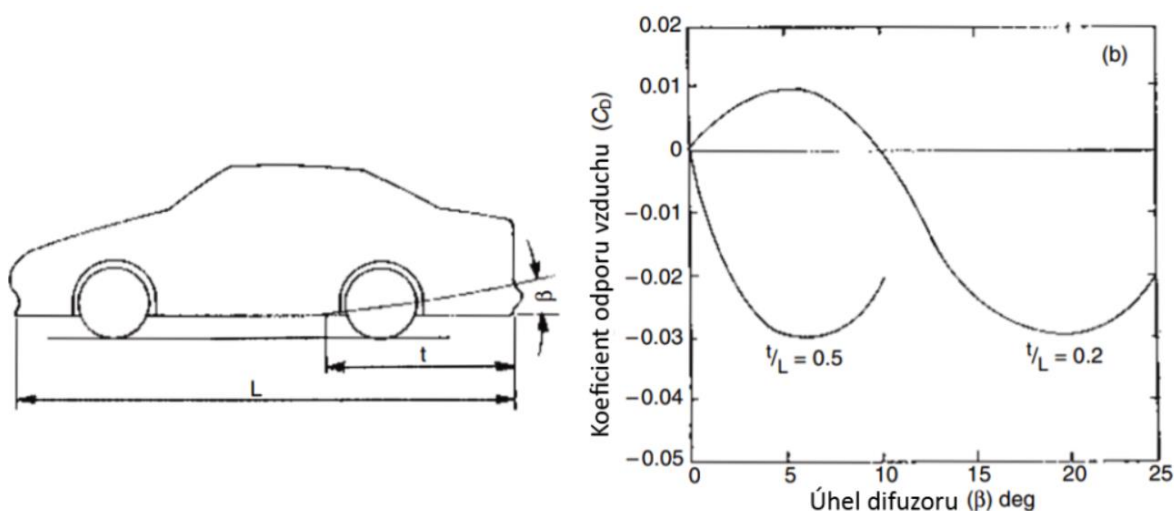
Generátory vírů, tzv. vortex generators (VGs), jsou malé prvky nejčastěji tvaru plochých obdélníku nebo trojúhelníku, které slouží ke zlepšení aerodynamických vlastností při nižších rychlostech. Jejich výška odpovídá mezní vrstvě, což je přibližně 15–30 mm. Hlavní funkcí VGs je oddálení místa odtržení mezní vrstvy od povrchu vozidla. Proto se umísťují těsně před místem odtržení. K odtrhávání mezní vrstvy při laminárním proudění dochází, jelikož mezní vrstva nemá již dostatek kinetické energie pro pohyb po povrchu vozidla. Generátory vírů mění laminární mezní vrstvu na turbulentní, tím se zvýší kinetická energie a dochází k pozdějšímu oddělení mezní vrstvy, což má pozitivní dopad na snížení vzniku úplavu a odporu [18]. Na druhou stranu samotná turbulentní mezní vrstva má větší třecí aerodynamický odpor, proto by turbulentní mezní vrstva neměla proudit po příliš dlouhém povrchu. Přesné účinky těchto přídavných prvků pro danou situaci je potřeba experimentálně otestovat. Výhodou je jednoduchost montáže. Nalepením na povrch karoserie se může manipulovat s pozicí umístění a při negativních účincích se můžou jednoduše odstranit. Generátory vírů také snižují výšku mezní vrstvy, proto vhodným umístěním může být podvozek, kde bez vizuálního dopadu a navýšení odporu sníží vztlačovou sílu [19].



Obr. 2-20 Generátory vírů na konci střechy automobilu [20]

2.4.6 Difuzor

Difuzor je rozšiřující se kanál umístěný na konci podvozku. Svou konstrukcí na začátku urychluje proud vzduchu pod vozidlem, čímž snižuje vztlačovou sílu. Díky svému rozšíření na konci se vzduch zase zpomaluje a zvyšuje tlak na hodnoty okolního prostředí. Zpomalený vzduch vycházející z podvozku tak netvoří turbulentní víry v úplavu za vozidlem, ale naopak vyplňuje prostor úplavu. Tím snižuje podtlak za vozem a výsledkem je nižší odpor vozidla [15] [21].



Obr. 2-21 Vliv tvaru zadní části podvozku na koeficient aerodynamického odporu [14]

2.5 CFD simulace

CFD je zkratkou anglického výrazu Computational Fluid Dynamics, což v překladu znamená výpočetní dynamika tekutin. Jedná se o nástroj využívaný v mechanice tekutin k simulaci fyzikálních dějů kapalin a plynů jako proudění, šíření tepla a mnoho dalších. Analytické řešení proudění je velmi náročné a ve složitých případech dokonce nemožné. Proto podstatou CFD jsou numerické výpočty, tedy přibližné řešení, systému parciálních diferenciálních rovnic popisující proudění. Jedná se o základní rovnice zákonů zachování hmotnosti, hybnosti a energie [22].

Funkce CFD zahrnuje oblasti mechaniky tekutin, numerické matematiky a počítačové techniky. Dříve si museli výpočtáři psát své vlastní specializované programy pro konkrétní účel použití. Dnes se převážně používají univerzální software jako například ANSYS Fluent, které mohou být použity pro široké množství aplikací. Jejich výhodou je výkonnost a jednoduchost změny vstupních parametrů.

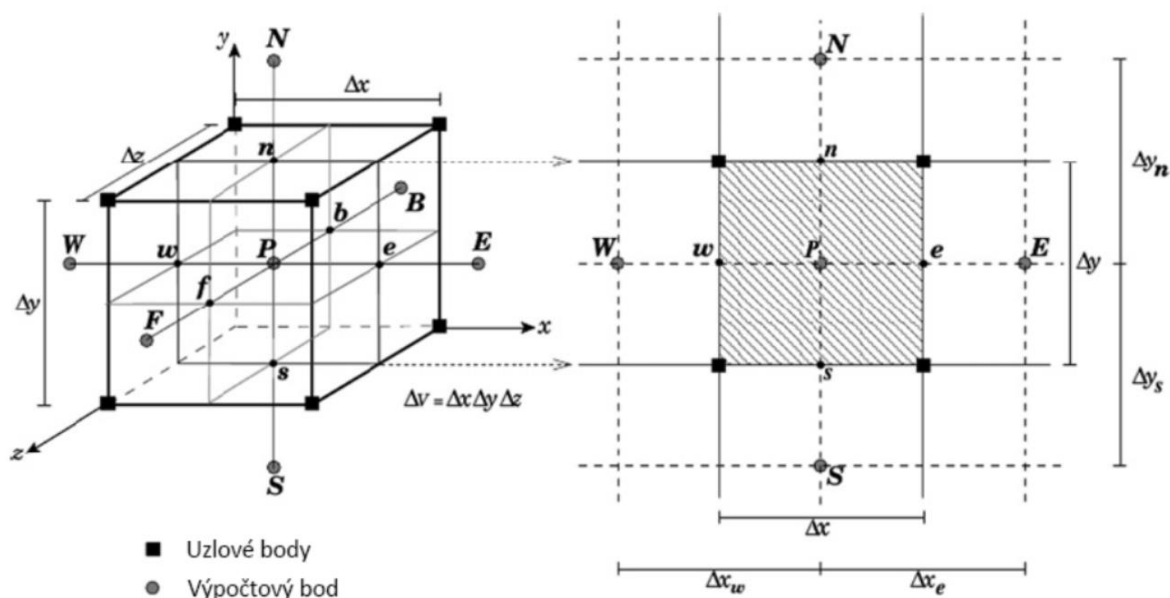
2.5.1 Princip funkce CFD modelování

Jak už bylo zmíněno výše, tak proudící tekutina je popsána systémem parciálních diferenciálních rovnic, vyjadřující zákony zachování hmoty, hybnosti a energie. Tyto rovnice jsou následně pomocí numerických metod převedeny na systém lineárních algebraických rovnic, které už lze lépe řešit. Konečné řešení vzniklé soustavy lineárních algebraických rovnic se získá iteračním řešením [22], např. Gauss-Seidelovou metodou. Nejpoužívanější numerické metody jsou metoda konečných prvků a metoda konečných objemů. V mechanice tekutin se využívá metoda konečných objemů, která je nejvhodnější z hlediska přesnosti a rychlosti výpočtu [23].

Metoda konečných objemů

Základem je rozdělení oblasti zájmu na velký počet malých prvků tvořící síť, tzv. konečných objemů. Všechny kontrolní objemy, které popisují systémy parciálních diferenciálních rovnic proudění, se integrují přes jednotlivé stěny a tím vzniknou spojitě integrální funkce. Tyto funkce popisují, jak se zachovávají zkoumané veličiny proudění jednotlivých kontrolních objemů. Následnou diskretizací spojitých funkcí získáme body, nejčastěji ve středu kontrolního objemu, které obsahují hodnoty zkoumaných veličin proudění daného prvku. Diskretizací se tedy integrální rovnice převedou na systém lineárních algebraických rovnic, přičemž pro každý prvek sítě existuje právě jedna lineární algebraická rovnice [22] [23].

Na obr. 2-22 je zobrazen příklad kontrolního objemu ve výpočetní síti, který je tvořen uzlovými body, stěnami a výpočtovým bodem reprezentovaný lineární algebraickou rovnicí.



Obr. 2-22 Kontrolní objem ve 3D a 2D prostoru [24]

Prvky sítě mohou mít mnoho tvarů, které také ovlivňují přesnost výpočtu. Nejčastěji ve 2D prostoru mají tvar trojúhelníku, čtyřúhelníku nebo šestiúhelníku. Zkoumaný objem může obsahovat více tvarů kontrolních objemů zároveň a podle toho se síť rozděluje na uniformní, obsahující jeden tvar, nebo hybridní s více tvary. Dále se síť dělí na konformní a nekonformní. Rozdíl mezi těmito typy je v návaznosti kontrolních objemů u hybridní sítě nebo při rozdělení zkoumané části na více částí. U konformní sítě je rohový bod prvku, tzv. uzel také rohovým bodem sousedního prvku. Při nekonformní síti je rohový bod prvku ve stěně sousedního. Z hlediska přesnosti je lepší konformní síť, protože u nekonformní může dojít ke ztrátě informací mezi jednotlivými prvky [25].

Počet generovaných konečných objemů roste přímo úměrně s požadovanou přesností, čímž se také zvyšuje výpočetní čas. Proto je velmi důležité i z hlediska konvergence výpočtu vytvoření optimální sítě kontrolních objemů. V místech náhlých změn zkoumaných veličin proudění se síť zhušťuje, kvůli minimalizaci numerické chyby a v oblastech stálých hodnot může být síť hrubší. Přechod hustot sítě by měl pro správnosti výpočtu probíhat plynule [25].

Při turbulentním proudění se situace značně komplikuje, protože hodnoty zkoumaných veličin popisující proudění se mění nepravidelně a velmi rychle. Na to současná výpočetní technika nestačí, a proto je potřeba zavést do výpočtu model pro turbulentní proudění.

2.5.2 Modelování turbulentního proudění

Turbulentní proudění se vyznačuje velkou frekvencí fluktuace veličin popisujících proudění. Proudící víry se postupně zmenšují na tak malou velikost, že dochází k disipaci, kde kinetická energie se mění na teplo. Pro výpočet turbulentního proudění jsou známy tři metody [25].

Metody výpočtu turbulentního proudění

První metodou je přímá numerická simulace, zkráceně DNS (Direct numerical simulation), která k řešení potřebuje velmi hustou síť. Metoda nevyužívá žádného zjednodušení v podobě modelu turbulentního proudění, a tudíž všechny vlastnosti proudění se řeší přímo v síti prvků. K tomu jsou potřeba velikosti prvků nejmenších vírů s délkou stěny 10–100 μm s velmi krátkým časovým úsekem, řádově 0,1 ms. To je tak výpočetně náročné, že dnešní superpočítače jsou schopny vypočítat jen velmi jednoduché případy proudění [22] [23].

Další metodou je simulace velkých vírů, zkráceně LES (Large eddy simulation), která pracuje jen s víry velkých rozměrů. Malé víry, které disipují svou energii jsou ve výpočtu reprezentovány tzv. subgridními modely. Tato metoda nevyužívá tak hustou síť v oblasti volného proudění, ale u kontaktních ploch je potřeba taky dostatečně hustá síť. Proto se LES používá jen v určitých případech [26].

Nejpoužívanější metodou pro modelování turbulentního proudění je metoda Reynoldsových rovnic, zkráceně RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations). Metoda pracuje na principu rozdělení okamžitých hodnot popisující turbulentní proudění Navier-Stokesovými rovnicemi na časově střední hodnotu a flukтуаční složku, čímž se převedou na Reynoldsovy rovnice. Tím se zjednoduší soustava parciálních diferenciálních rovnic, ale vzniknou taky nové neznámé, takže soustava nemá řešení. Proto se k nalezení řešení používají modely turbulencí, které umožní určit přidané neznámé tzv. Reynoldsovy členy. Tato metoda používá nejhrubší síť a díky vhodným modelům turbulencí dosahuje relativně rychlých výpočtů se zachováním vysoké přesnosti [22] [23].

Modely turbulence

Modelů pro výpočet turbulentního proudění je velké množství a každý je specifický svými vlastnostmi. Zde si popíšeme jen základní modely metody RANS.

Algebraické, nevyužívající žádnou diferenciální rovnici a jednorovnicové, které do výpočtu proudění přidávají jednu diferenciální rovnici, se používají převážně v letectví. V ostatních aplikacích negenerují správné výsledky [23].

Nejpoužívanější jsou dvourovnicové modely, konkrétně k - ε model. Proměnná k označuje energii turbulence a ε rychlost disipace energie turbulence. Tento model lze použít na téměř všechny aplikace při dosažení relativně přesných výsledků za krátkou dobu výpočtu. Nedostatky se objevují při rotujícím proudění, velkém zakřivení mezní vrstvy a velkém tlakovém spádu. Tyto nedostatky řeší modifikované k - ε modely, které zpřesňují a urychlují výpočet. Druhým typem dvourovnicových modelů je k - ω model, kde turbulentní disipace energie je nahrazena měrnou turbulentní disipací energie ω . Výhodou modelu je přesnost v oblasti malých turbulencí a mezní vrstvě [23]. Modifikovanou verzí je SST k - ω model, který kombinuje k - ε a k - ω model. Tento typ má mnoho výhod a v praxi je nejvíce využíván. Své uplatnění nachází v aerodynamice, při zkoumání odtržení proudu vzduchu od povrchu a při řešení tlakového působení na stěny.

Existují také tři a vícerovnicové modely, které slouží k přesnějším výpočtům. V praxi se však kvůli výpočetní náročnosti používají méně.

2.5.3 Postup výpočtu CFD simulací

Postup při výpočtu proudění pomocí CFD je následující:

1. Vytvoření geometrie součástí
2. Generování sítě kontrolních objemů
3. Definování okrajových podmínek
4. Nastavení modelu turbulence
5. Výpočet simulace
6. Analýza výsledků

Tvorba geometrie součástí

Komponenty důležité pro simulaci proudění lze vytvořit v libovolném CAD softwaru pro 3D modelování, které se následně importují do CFD softwaru.

Generování sítě

Jedná se o jednu z nejdůležitějších a nejpracnějších etap simulace. Špatně zvolená síť může způsobit nepřesné výsledky a nestabilitu iteračního výpočtu. Vytvořený model součástí rozdělíme podle potřeby na několik podčástí, což může v praxi znamenat oddělit vstup výstup, zdroj energie atd. Tyto části následně rozdělíme na velký počet malých prvků, tzv. síť. Hustota sítě závisí na tom, jak přesné hodnoty požadujeme. Pokud chceme získat informace o proudění v mezní vrstvě a místech náhlých změn zkoumaných veličin, tak síť lokálně zhrustíme. V místech, kde nedochází k velkým změnám může být síť hrubší. Díky tomuto postupu můžeme dosáhnout optimální sítě, pro správnost výsledků. Rychlost výpočtu bude záviset na velikosti operační paměti počítače a výsledném počtu prvků, který se může pohybovat od několika tisíc až po několik milionů v závislosti na řešeném problému [22].

Definice okrajových podmínek

V této fázi je nutné definovat co, jak a kde působí na soustavu. V případě aerodynamiky se určí směr a rychlost proudění vzduchu na soustavu. U energetických aplikací se může definovat např. místo a velikost přiváděného tepla, typ přenosu tepla atd.

Volba modelu turbulence

Volba modelu turbulence závisí na konkrétním případě řešení a oblasti našeho zájmu. Jelikož při proudění tekutin většinou dochází k laminárnímu i turbulentnímu proudění, případně smíšenému, tak standardní modely, které platí jen v oblasti turbulentního proudění, musíme modifikovat. K tomu se používají např. stěnové funkce nebo dvouzónové modely turbulence [22].

Výpočet simulace

Samotný numerický výpočet není zcela automatický a v případě potřeby je nutné do něho zasahovat. Požadujeme konvergenci řešení a stabilitu výpočtu. Proto během simulace vhodně upravujeme vstupní parametry pro optimální průběh výpočtu [22].

Analýza výsledků

Poslední fází je analýza výsledků, kde na základě vygenerovaných hodnot a grafů zhodnocujeme výsledky a případně porovnáváme s experimentálně naměřenými hodnotami.

2.5.4 Oblasti využití

Díky navyšujícímu se výkonu počítačů mají CFD simulace široké uplatnění v mnoha odvětvích. Od počátečních vojenských účelů pro stavbu letadel je v současnosti přesah do automobilového průmyslu, medicíny, energetického a chemického inženýrství až po sport.

V automobilovém průmyslu se používá převážně k optimalizaci aerodynamického odporu, vzlaku a modelování HVAC systému, obr. 2-23. Velmi podstatnou roli mají také v oblasti medicíny, kde je značně složité získat potřebné informace experimentálně. Proto nachází uplatnění pro simulaci dýchání a proudění krve v lidském těle. Energetika CFD simulace využívá pro návrh lopatek turbín pro co nejvyšší účinnost nebo třeba k analýze vzniku škodlivin při spalování paliva. Ve sportovním odvětví se stále snaží překonávat lidské hranice. Jedním dlouhou dobu nepřekonatelným limitem byl také zaběhnout maraton pod dvě hodiny. Tento limit se podařilo překonat v roce 2019, kdy Eliud Kipchoge za pomoci optimální formace vodičů, pro co nejnižší odpor vzduchu, zaběhl maraton za 1:59:40. Optimální formace běžců byla docílena právě díky CFD simulacím.



Obr. 2-23 Vizualizace proudění pomocí CFD simulace kolem závodí formule [27]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Návrh karosérie vozidla s ohledem na jeho aerodynamické vlastnosti je v současné době nedílnou součástí konstrukčního vývoje. Obzvláště u závodních vozidel, kde o vítězi rozhodují i setiny sekundy, je potřeba navrhovat a optimalizovat vozidlo tak, aby dosahovalo co možná nejlepších jízdních vlastností a výkonnosti. Z těchto důvodů je žádoucí navrhnout kapotu, pokrývající vrchní a přední část, závodního pneumobilu Typhoon pro co nejnižší odpor vzduchu tak, aby v soutěžních kategoriích získal výhodu nad soupeři. Pneumobil poháněný stlačeným vzduchem dosahuje rychlosti kolem 50 km/h. Právě kvůli relativně nízké rychlosti není zcela nutné se soustředit na přítlačnou sílu vzduchu na vozidlo a jeho aerodynamickou stabilitu, ale spíše se zaměřit na snížení odporu vzduchu, který vzniká při jízdě a tím dosáhnout lepších výsledků.

Při navrhování s ohledem na aerodynamické vlastnosti nelze zcela definovat obecně správnou topologii a konstrukci kapoty, protože určitý prvek karoserie může mít pozitivní vlastnosti jen místně, ale v komplexním obraze obtékání může naopak způsobovat negativní dopad. Proto je nutné průběžně provádět CFD simulace koncepčních návrhů a na základě výsledků analýz iteračním postupem úprav dosáhnout nejvhodnějšího tvarování. Pomocným vodítkem k dosažení optimální topologie mohou být výsledky ze zkoušek karoserií osobních vozů uvedené v řešeršní části. Při návrhu je také potřeba brát v úvahu rozměry, geometrii a celkovou zástavbu pneumobilu, tak aby kapota respektovala nejenom nosné a funkční součásti vozidla, ale také ergonomický aspekt řidiče.

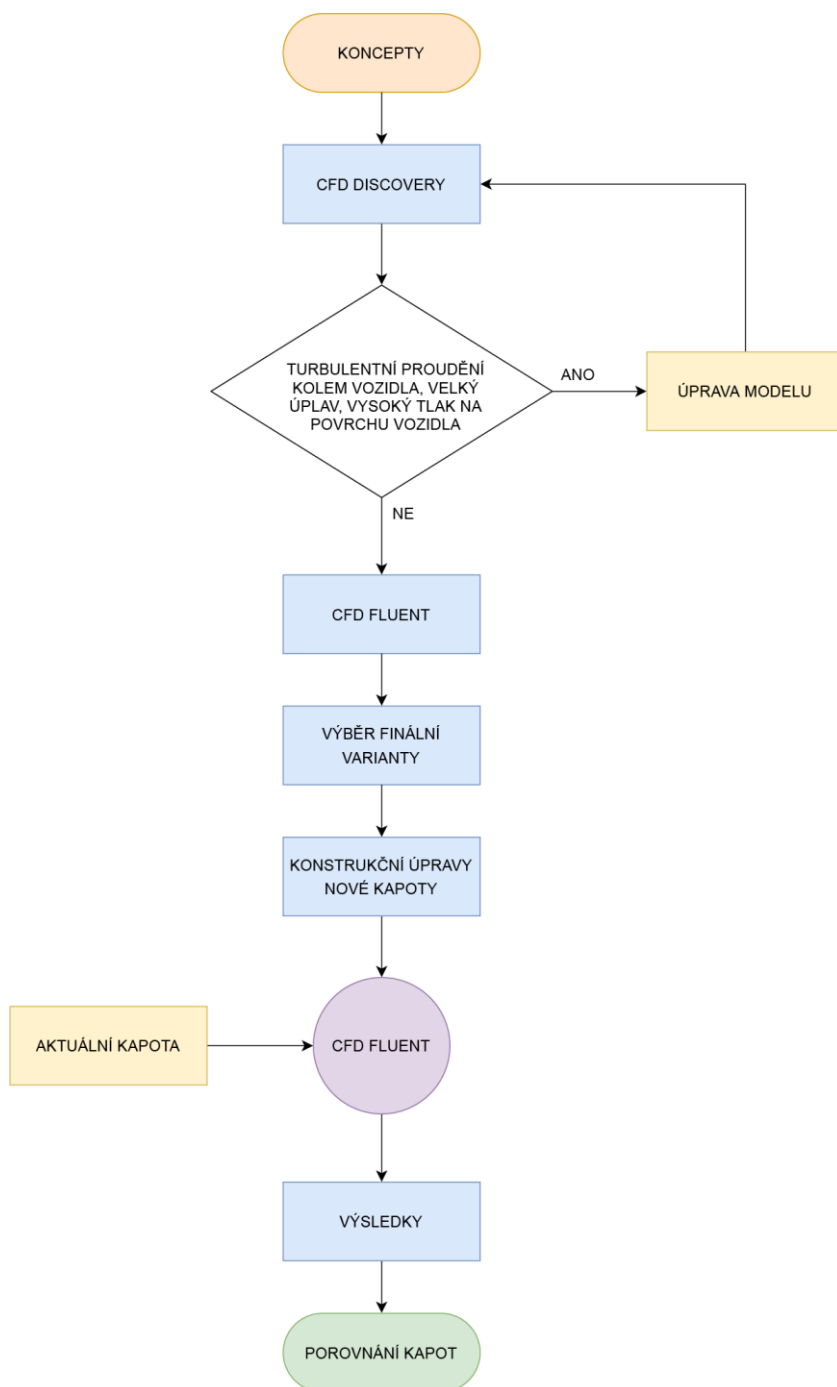
3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je navrhnout kapotu pneumobilu Typhoon pro co nejnižší odpor vzduchu. Mezi dílčí cíle práce potom patří:

- Navrhnout a vymodelovat alespoň tři koncepční varianty s ohledem na komplexní aerodynamiku pneumobilu Typhoon
- Nastavit a provést CFD simulace jednotlivých návrhů
- Vybrat finální variantu, dosahující nejnižšího odporu
- Porovnat a vyhodnotit výsledky s aktuální kapotou

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Začátek návrhového procesu byl zaměřený na definování základního tvaru kapoty vzhledem k uspořádání konstrukčních celků pneomobilu Typhoon. V průběhu této fáze vznikalo více návrhů, které byly podrobeny základní počítačové analýzy proudění. Podle toho byly následně varianty iteračně upravovány a vylepšovány tak, aby bylo dosaženo co nejnižšího aerodynamického odporu. Pro lepší názornost je celý postup návrhového procesu kapoty až po finální řešení zobrazen na obr. 4-1.



Obr. 4-1 Schéma postupu práce návrhu kapoty

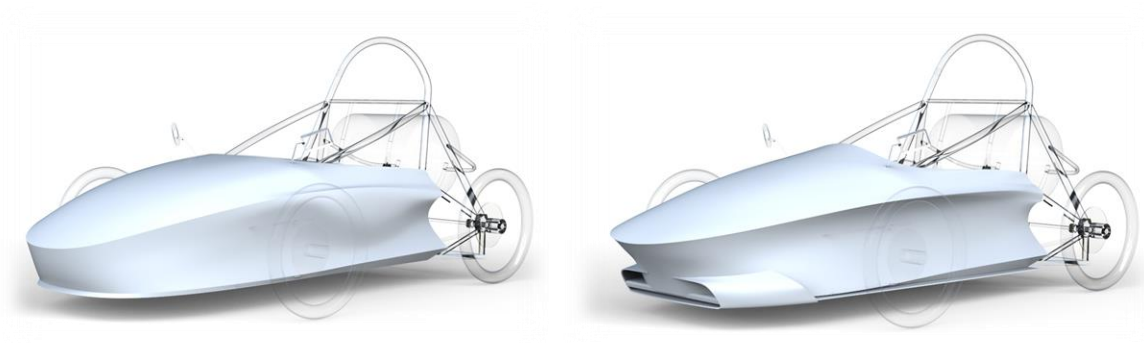
4.1 Varianta I

První varianta má vyšší zaoblenou náběžnou hranu přecházející plynule k bokům kapoty. Odtud pozvolna stoupá a za zpětnými zrcátky začíná postupně klesat. Společně s boční hranou mírně stoupá od náběžné hrany také vrchní část kapoty směrem k řidiči. Profilově konkávně oblý nárazník plynule přechází do bočnic, které jsou vypouklé směrem do karoserie pneumobilu. Na čelní straně u podvozku se navíc nachází přední spoiler.



Obr. 4-2 Vizualizace varianty I

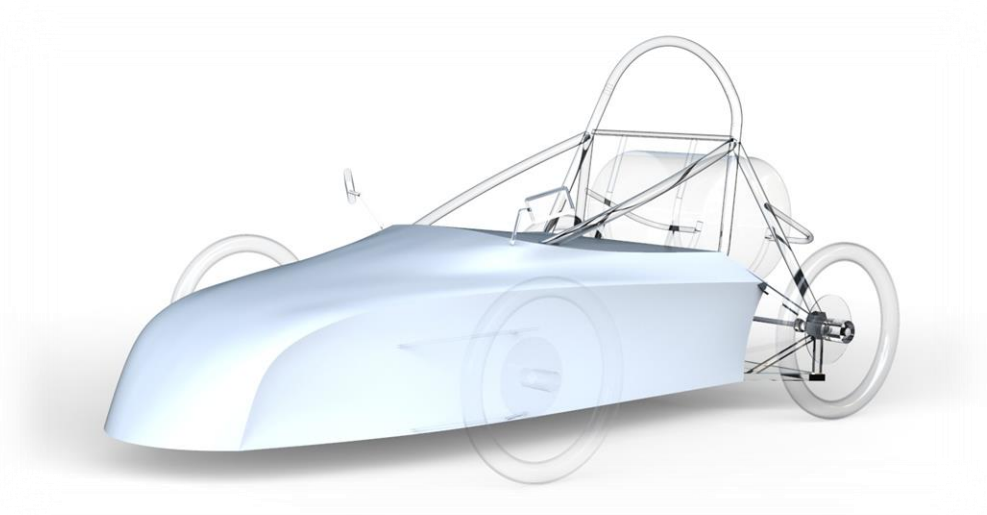
Během modelování docházelo k mnoha změnám. Původně tato varianta měla ostrou náběžnou hranu. Dle výsledků CFD simulací se to však jevilo jako nežádoucí, a proto byla následně zaoblena, což přispělo k výraznému poklesu odporu. Mezi dalšími uvažovanými prvky v průběhu návrhového procesu bylo vyboulení na bočnicích do tvaru obráceného křídla, masivní přední spoiler a byla měněna poloha náběžné hrany od vozovky. Taký byl pozorován vliv konvexního a konkávního tvaru nárazníku. Konkávní tvar v případě této varianty dosahoval lepších hodnot z hlediska odporu. Většina uvedených prvků však neměla pozitivní dopad na snížení odporové síly.



Obr. 4-3 Průběh vývoje a modifikací varianty I

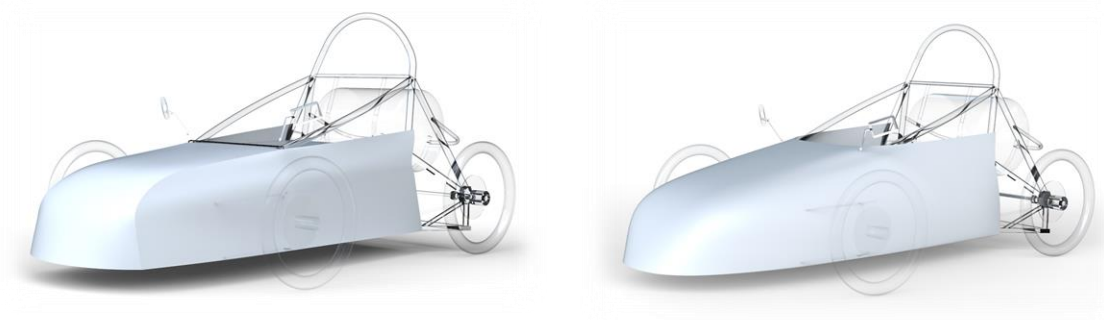
4.2 Varianta II

Charakteristickým prvkem druhé varianty je sklopená před' až k podvozku. Odtud společně s profilovou hranou strmě stoupá. V úrovni předních kol následně vrchní část mírně stoupá, ale profilová křivka již pozvolna klesá k zadnímu rámu. Bočnice u podvozku kopírují karoserii a spojením s profilovou hranou kapoty tvoří zvlněnou plochu.



Obr. 4-4 Vizualizace varianty II

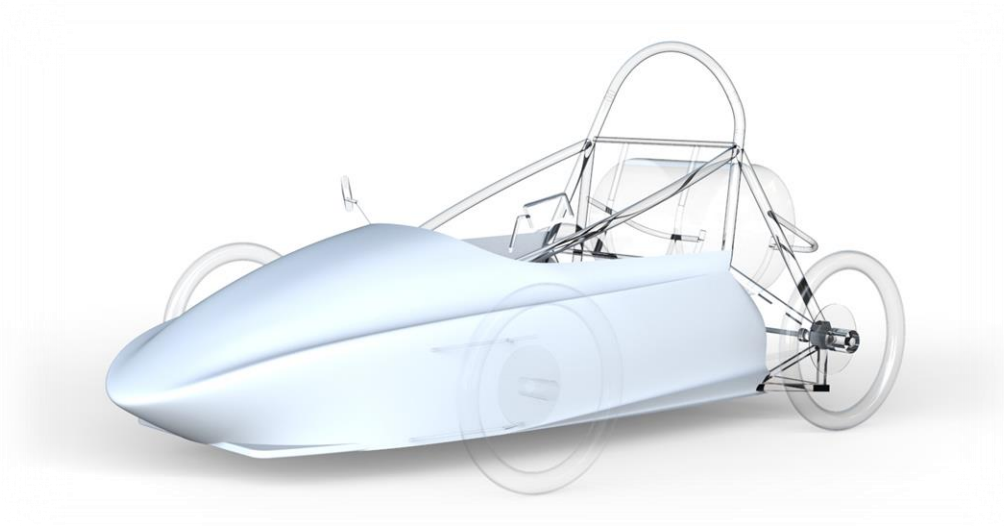
U této varianty byly upravovány především bočnice. V jednom případě byly vypouklé směrem do karoserie a spodní křivka u podvozku byla po celé délce vozidla rovná, což mírně rozšířilo nárazník. Další možností potom bylo odstranění profilové křivky a plynulé spojení bočnic s vrchní částí a nárazníku. V obou případech byly také bočnice vyvýšeny v zadní části. Uvedené změny však neměly zásadní vliv na snížení aerodynamického odporu.



Obr. 4-5 Průběh vývoje a modifikací varianty II

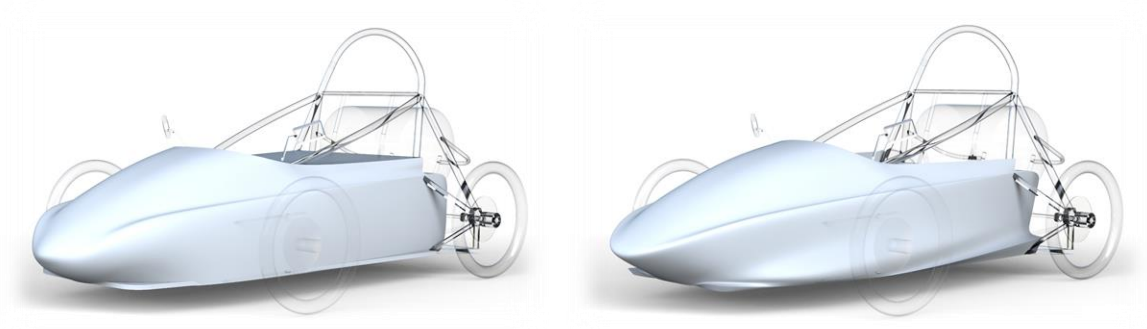
4.3 Varianta III

Třetí varianta má nízkou zaoblenou náběžnou hranu plynule přecházející k bokům kapoty, odkud pozvolna stoupá až k zadnímu rámu. Vrchní část je svažitá od řidiče k náběžné hraně. Oblý nárazník je spojen s vypouklými bočnicemi. U podvozku se nachází jak přední spoiler, tak boční spoilery.



Obr. 4-6 Vizualizace varianty III

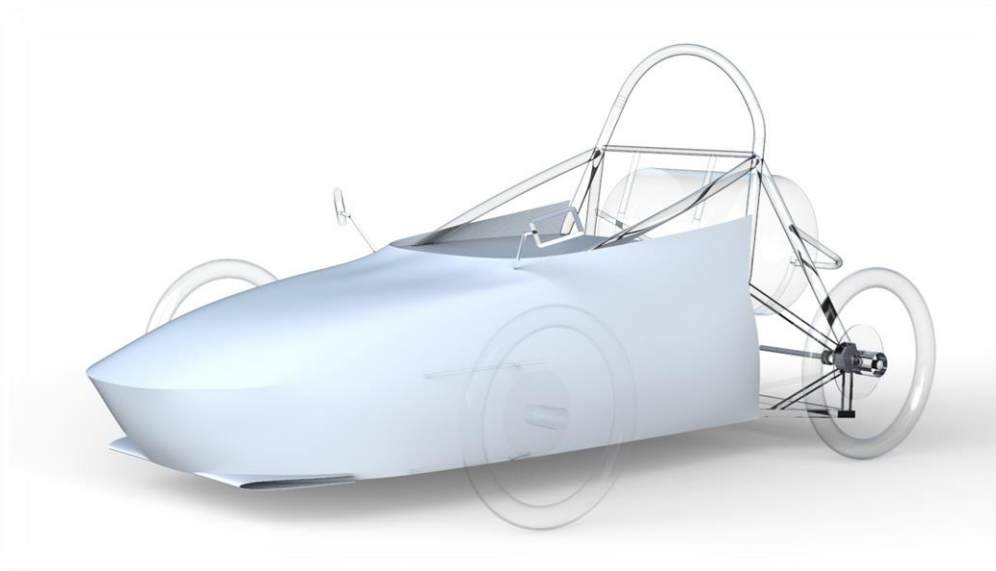
Model třetí varianty kapoty byl upravován především v oblasti nárazníku a náběžné hrany tak, aby zde nebyly náhle tvarové změny. Kromě toho byla hledána optimální velikost půdorysného vyklenutí bočnice. Původně byl nárazník více do špičky a mezi přechodem vrchní části a bočnic byl žlábek. Ten byl nakonec odstraněn, jelikož zde docházelo k turbulentnímu proudění. Další modifikace probíhaly v oblasti přední nápravy, kde byl pozorován vliv vyboulení, což mělo snížit působící tlak na přední tlumiče. Díky tomu došlo k mírnému zlepšení, ale z konstrukčního hlediska tento prvek nebyl vhodný.



Obr. 4-7 Průběh vývoje a modifikací varianty III

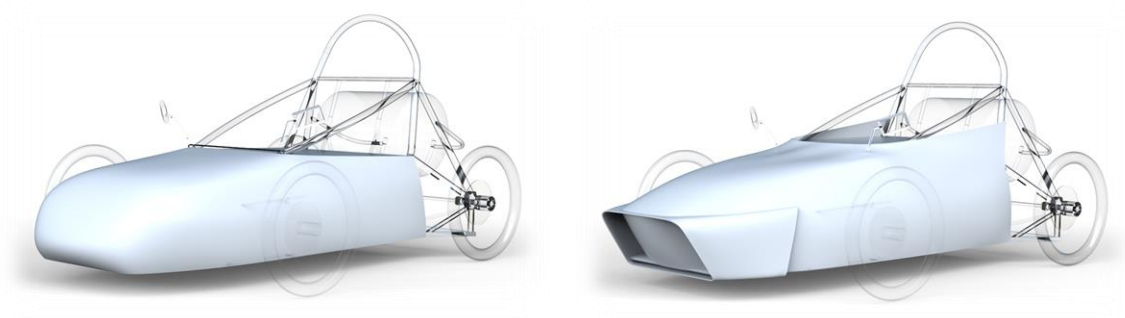
4.4 Varianta IV

Poslední čtvrtá varianta má ostrou náběžnou hranu, která plynule přechází do bočnic, kde postupně s nimi splyne. Vrchní část může připomínat tvarování do písmene S. Od náběžné hrany kapota stoupá, následně nad předními koly je téměř horizontálně napříměna a těsně před volantem řidiče opět začíná stoupat. Bočnice jsou po celé délce oblé a v zadní části jsou vyvýšeny. Na nárazníku spojeném s bočnicemi se nachází menší přední spoiler.



Obr. 4-8 Vizualizace varianty IV

Tato varianta taky prošla několika modifikacemi. Byla snížena a zaoblена náběžná hrana a celkový koncept byl zaoblen tak, aby kapota těsně obepnula celou karoserii pneumobilu a nebyl na ní žádný zásadní zlom nebo náhlá tvarová změna. V tomto případě však vznikala velká tlaková síla působící na řidiče. Taky byl přidáván velký přední spoiler, který měl odklonit proudění od přední nápravy a tím snížit turbulentní proudění v této oblasti. To nakonec nemělo pozitivní dopad na snížení odporové síly, jelikož došlo k rozšíření čelní plochy vozidla.

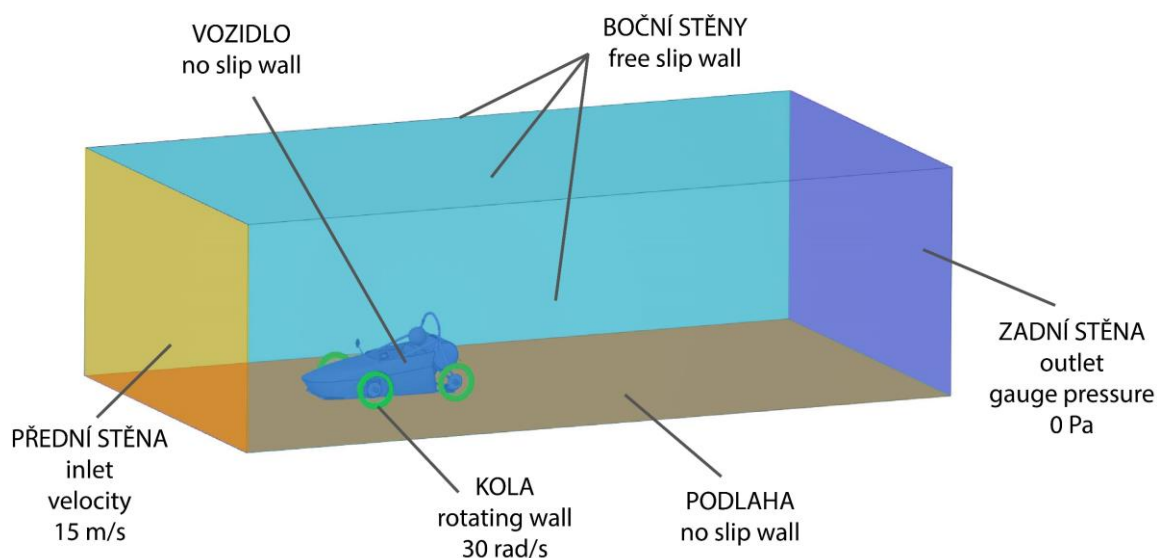


Obr. 4-9 Průběh vývoje a modifikací varianty IV

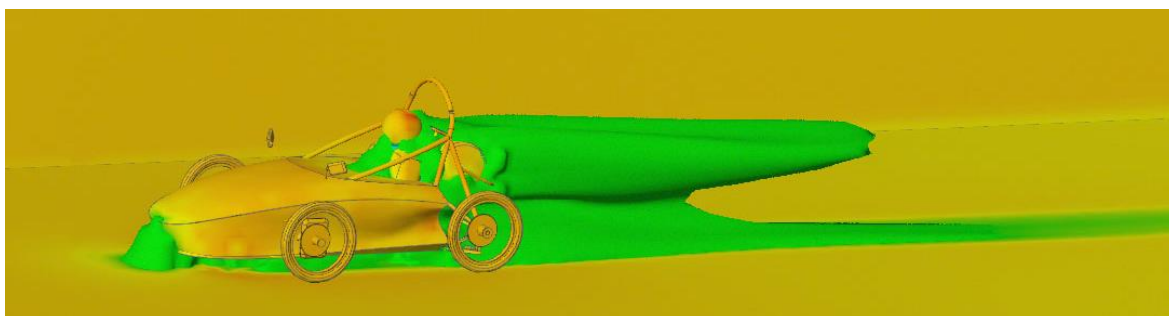
4.5 CFD analýza konceptních variant

V průběhu vývoje konceptních návrhů docházelo k řadě úprav, které bylo nutné průběžně analyzovat. Standardní CFD analýzy k tomuto účelu nejsou z časového hlediska zcela vhodné. Proto bylo využito software Ansys Discovery, který simuluje proudění v reálném čase a nastavení je značně jednodušší a rychlejší než v případě standardních CFD simulací. Tato technologie sice nedosahuje tak vysoké přesnosti, ale pro vizualizaci proudění a pozorování vlivu jednotlivých změn poskytuje cenné informace. Značná část nastavení je shodná jako v Ansys Fluent, jehož podrobnější postup bude popsán v konstrukčním řešení. Zde bude zmíněn jen stručný postup analýzy pomocí Ansys Discovery.

Nejdříve je potřeba připravit geometrii modelu a následně vytvořit doménu, na které se určí okrajové podmínky. Na obr. 4-10 je zobrazena volba okrajových podmínek výpočtu. Nakonec zvolíme model turbulence a spustíme simulaci. Hlavní rozdíl oproti simulaci v Ansys Fluent je nemožnost vytvoření výpočetní sítě. Tudíž nelze posoudit, jak software daný model matematicky vidí a jak počítá definovanou geometrii. Proto může docházet k nepřesnostem a malé prvky nemusí být zahrnuty do výpočtu.



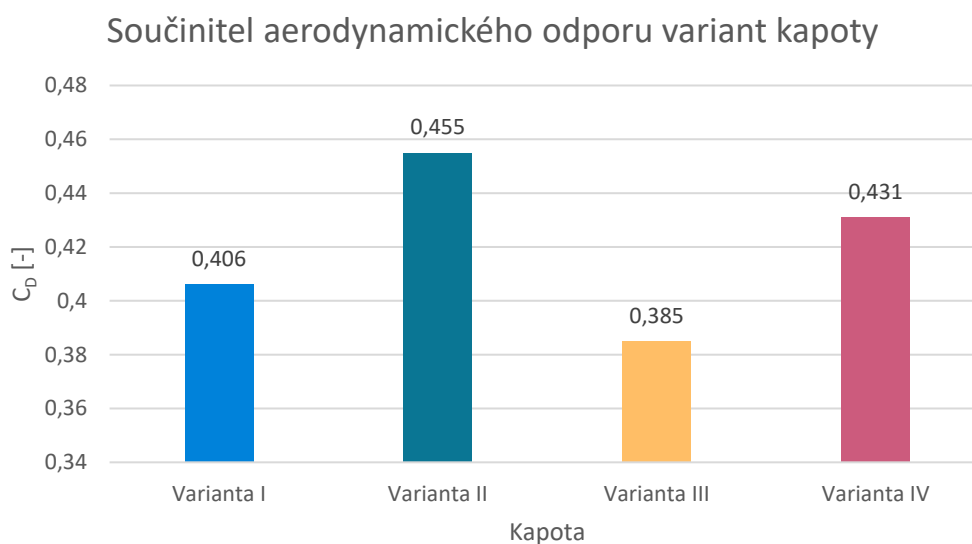
Obr. 4-10 Připravená geometrie a okrajové podmínky v Ansys Discovery



Obr. 4-11 Vizualizace proudění kolem vozidla v Ansys Discovery

4.6 Výsledky koncepčních návrhů

Dosažené výsledky součinitele aerodynamického odporu koncepčních variant jsou na obr. 4-12. Tyto výsledky byly získány pomocí software Ansys Fluent, který při správném nastavení dosahuje vyšší přesnosti výpočtu oproti Ansys Discovery.



Obr. 4-12 Graf zobrazující hodnoty součinitele aerodynamického odporu koncepčních variant

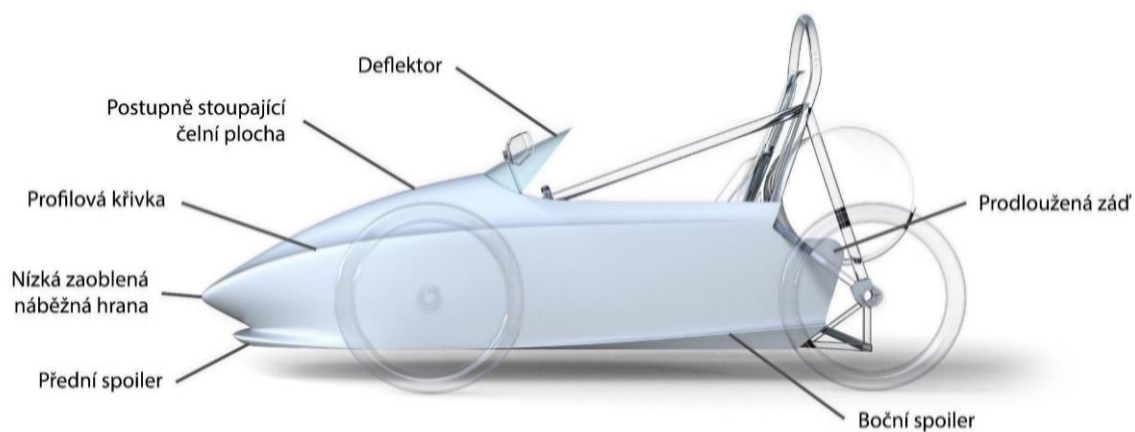
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Finální tvarové řešení kapoty



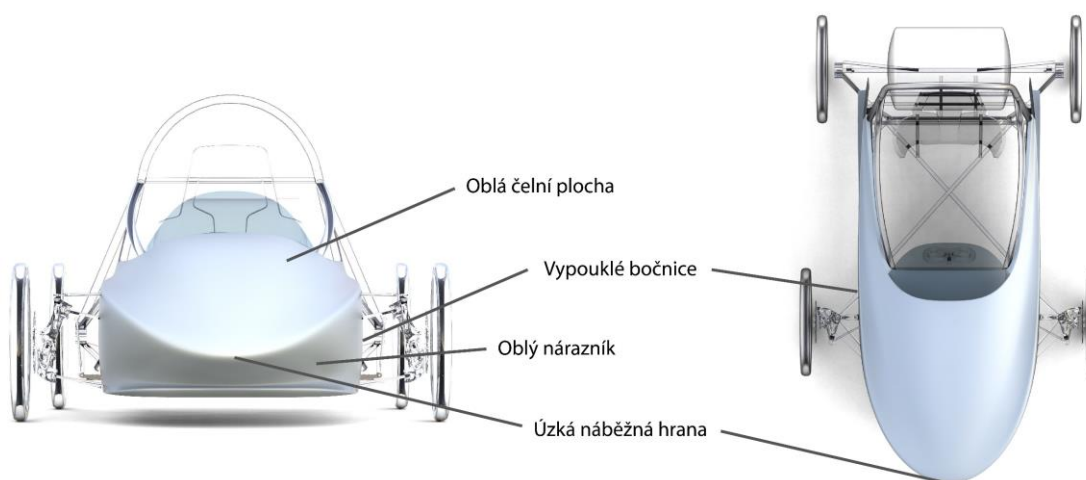
Obr. 5-1 Vizualizace nově navržené kapoty

Finální tvarování kapoty vychází z koncepční varianty III, která dosahovala ze všech návrhů nejnižšího součinitele aerodynamického odporu. Tento návrh byl ještě mírně upraven vzhledem ke konstrukčním prvkům pneumobilu.



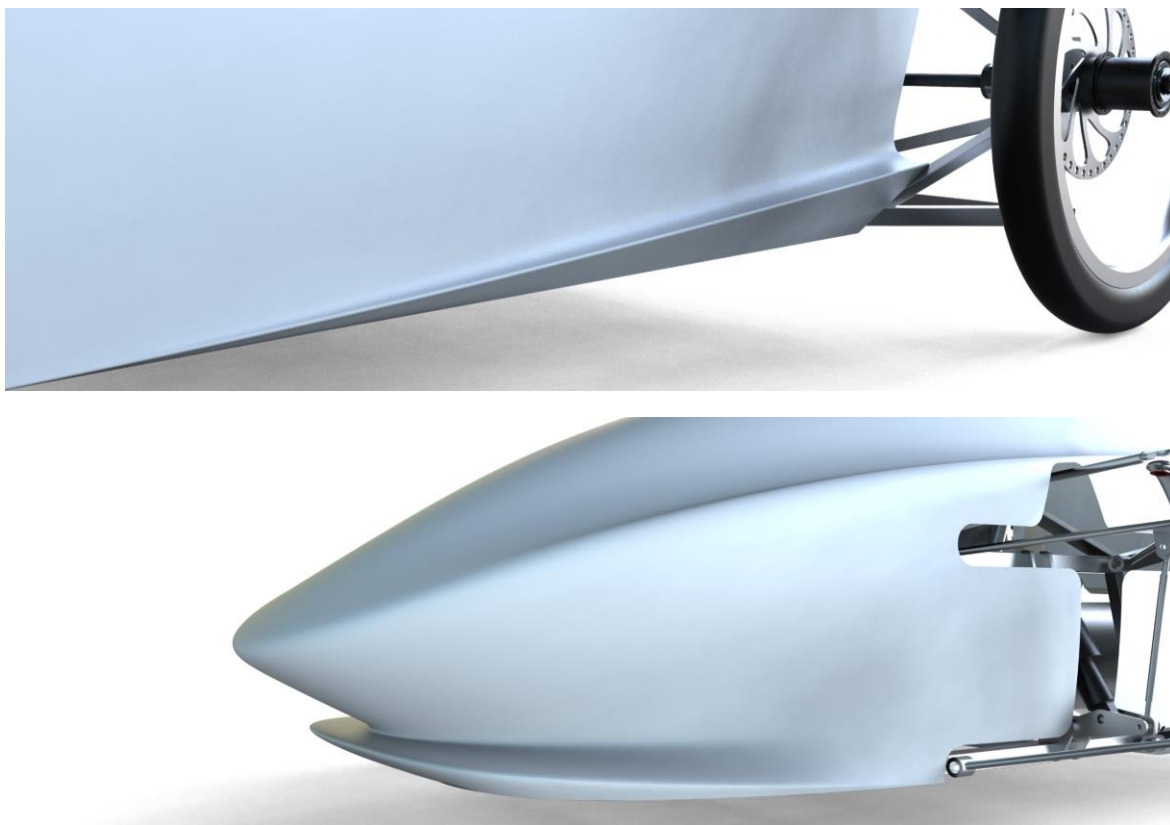
Obr. 5-2 Aerodynamické prvky kapoty z profilu

Nově navržená kapota má nízkou zaoblenou náběžnou hranu prodlouženou směrem dopředu. To způsobilo redukci plochy nárazníku, na který působí největší protisíla. Plynule stoupající vrchní část od náběžné hrany směrem k řidiči urychluje proudění a díky tomu snižuje statický tlak působící na čelní plochu kapoty. Na konci vrchní části byl přidán deflektor ve formě plexiskla, který usměrňuje proud vzduchu přes řidiče a tím významně snižuje odpor. Boční profilová křivka plynule spojená s náběžnou hranu je odsazená od vrchní části kapoty. Nejdříve strměji stoupá z důvodu konstrukčních prvků přední nápravy a za předními koly se jen pozvolna zvedá k zadnímu rámu, kde se spojují bočnice s vrchní částí. Díky odsazení profilové křivky vzniká mezi bočnicemi a svažitou vrchní částí oblá plocha, která stoupá přes celou délku vozu, tím definuje směr proudění vzduchu a v zadní části ho usměrňuje mezi otvory v rámové konstrukci. Nárazník je plynule propojen s vypouklými bočnicemi, aby nedocházelo k náhlým změnám proudění a tím nežádoucím turbulencím. Na nárazníku u podvozku se nachází přední spoiler, který slouží především k upevnění kapoty na karoserii, jelikož nárazník prochází mezi nosnými profily rámu. Kromě toho navíc přední spoiler příznivě ovlivňuje obtékání kolem vozu. Na bocích v oblasti podvozku jsou boční spoilery, které omezují mísení vzduchu mezi podvozkem a bočnicemi a tím zabráňují vzniku turbulencí po bocích kapoty. Bočnice jsou prodlouženy co nejvíce dozadu mezi rámovou konstrukci tak, aby docházelo k odtrhávání proudu vzduchu až na konci vozidla.



Obr. 5-3 Aerodynamické prvky kapoty z čelního a půdorysného pohledu

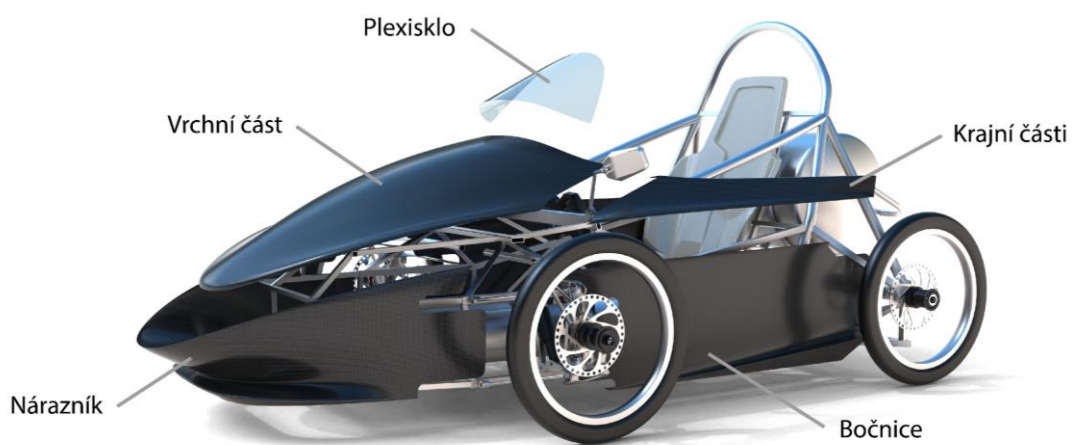
Kapota je také oblá z čelního pohledu, tím dochází k hladkému a plynulému obtékání pneumobilu. Úzká náběžná hrana a oblý nárazník společně s mírně vypouklými bočnicemi urychlují proudění a půdorysné tvarování do kapkovitého tvaru snižuje vznik úplavu za vozidlem.



Obr. 5-4 Detaily finálního řešení navržené kapoty

5.2 Návrh rozdělení kapoty

Kapotu z konstrukčně technologických důvodů nelze vyrobit v jednom kuse. Proto je nutné ji rozdělit na několik samostatných dílů, které se následně upevní k rámu pneumobilu v jeden celek. Návrh možného rozdělení je zobrazen na obr. 5-5. Celkem by se jednalo o sedm dílů.



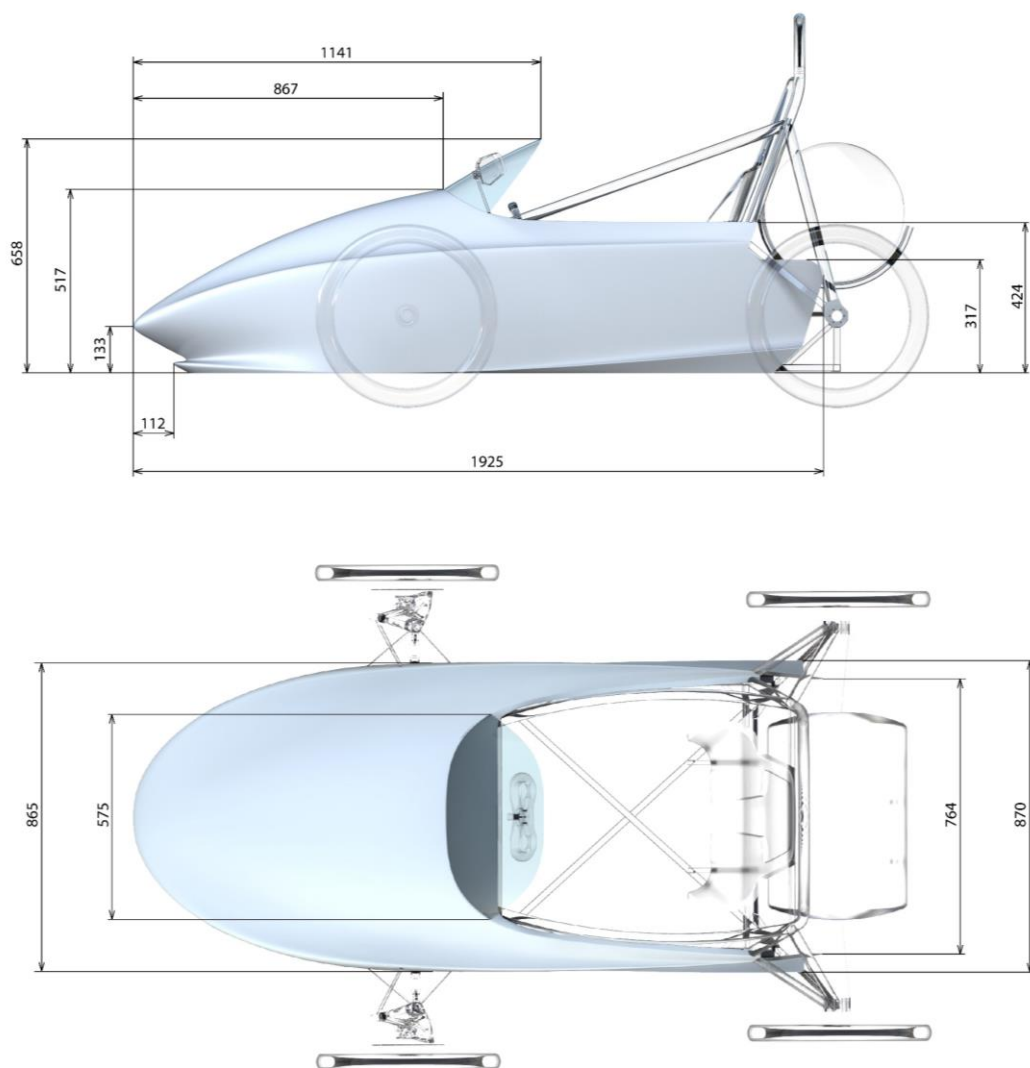
Obr. 5-5 Části kapoty po rozdělení

U pneumobilu Typhoon dochází k výměně tlakové láhve pohánějící vůz z přední strany. K této výměně dochází po každé delší jízdě, proto je potřeba mít k tlakové nádobě snadný přístup. Z toho důvodu je přední nárazník snadno oddělitelný a před výměnou tlakové láhve se jednoduše vysune a po výměně znovu zasune. K tomuto účelu poslouží přední spoiler na nárazníku, který se opře o rámovou konstrukci. Tím dojde k vymezení polohy a snadné manipulaci.

5.3 Základní rozměry

Rozměry kapoty vychází především z referenční geometrie rámu Typhoonu. Dle toho byla kapota tvarována, tak aby splnila potřebné aerodynamické vlastnosti.

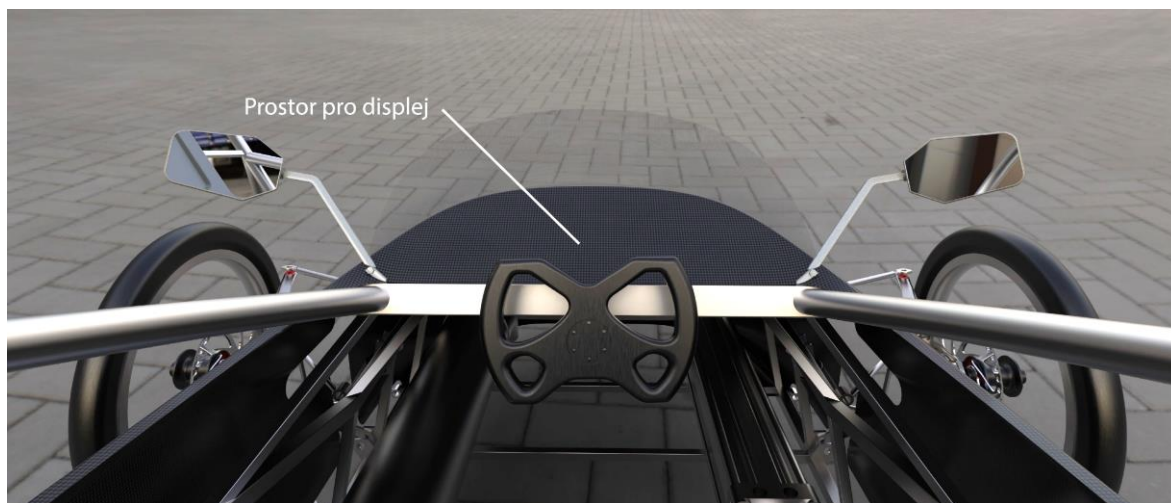
Celková délka kapoty je 1925 mm, maximální šířka dosahuje 870 mm a na výšku má 517 mm bez přídavného plexiskla. S plexisklem se výška dostane na hodnotu 658 mm.



Obr. 5-6 Základní rozměry kapoty

5.4 Ergonomie kapoty

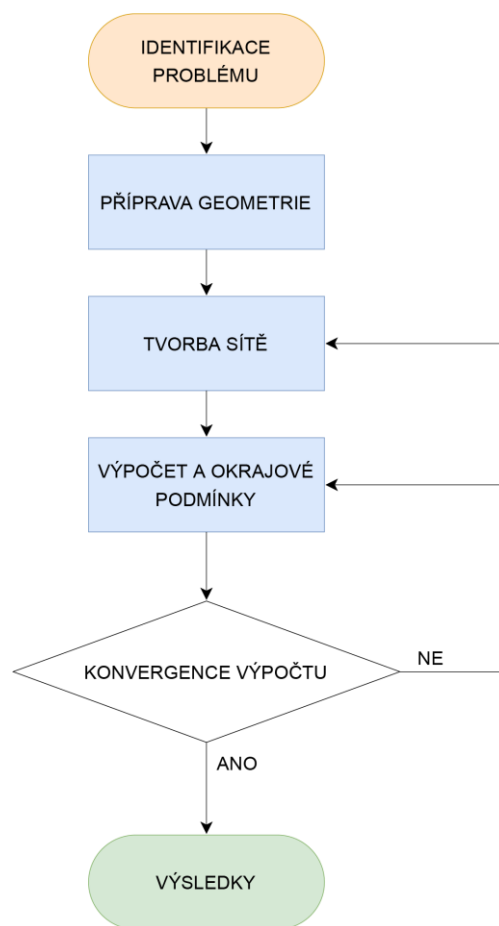
Navržená kapota by kromě technického hlediska měla brát v úvahu vliv na samotného řidiče. Neměla by překážet při nastupování a vystupování z vozidla a také by neměla překážet ve výhledu za volantem. Na obr. 5-7 je vizualizován pohled z místa řidiče a je vidět, že přidáním plexiskla nad volantem nedochází k omezení výhledu ani řiditelnosti. Dále je nad volantem vymezen prostor pro umístění displeje, aby byl řidič informován o stavu vozidla v průběhu jízdy.



Obr. 5-7 Vizualizace pohledu z místa řidiče

5.5 Postup a nastavení CFD analýzy

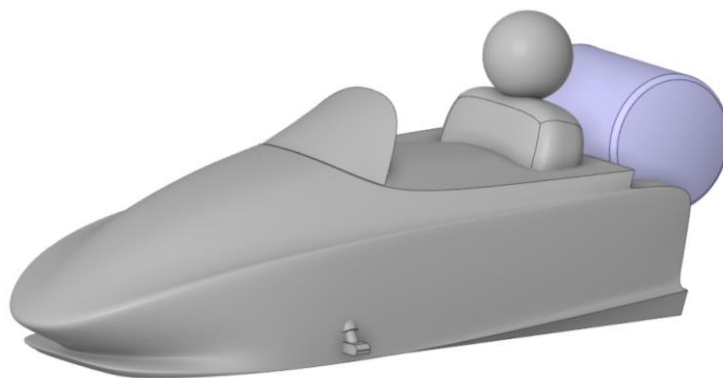
Na začátku CFD analýzy je vhodné si určit co chceme pozorovat a co je podstatné pro náš výpočet. Tato počáteční úvaha nám pomůže v průběhu celého výpočetního procesu. Na obr. 5-8 je zobrazeno schéma postupu celé výpočetní analýzy pomocí CFD. Jedná se o iterační proces na základě konvergence výpočtu. V následujících kapitolách budou jednotlivé části popsány a prezentovány na software Ansys Fluent, ve kterém byly simulace prováděny.



Obr. 5-8 Postup výpočtu CFD analýzy

5.5.1 Příprava geometrie

První částí procesu simulace je příprava samotné geometrie kapoty, kterou chceme analyzovat. Kapota byla modelována v otevřených plochách, což pro výpočet není vhodné. Proto ji bylo potřeba uzavřít, tak aby tvořila objemové těleso. Pro výpočet byla využita studentská verze Ansys Fluent, která má omezené množství buněk výpočetní sítě. Proto bylo potřeba geometrii co nejvíce zjednodušit. Jelikož jde především o snížení odporu pneumobilu pomocí navrhované kapoty, tak nebyl pro výpočet uvažován rám vozidla a nápravy s koly. Následně po importování takto upraveného modelu pneumobilu do prostředí Ansys SpaceClaim byla geometrie opravena pomocí automatických funkcí. Došlo k redukci malých ploch, spojení přerušovaných hran a dalším opravám, které pomůžou pro lepší generování sítě a následnou konvergenci. Navíc byla uvažována jenom polovina upraveného modelu, jelikož je symetrický a lze předpokládat stejné účinky na obě poloviny při čelním proudění vzduchu.



Obr. 5-9 Zjednodušená geometrie CFD simulace

Po připravení geometrie se definuje doména, která reprezentuje vzduch kolem vozidla. K zajištění správného výpočtu je potřeba doménu kolem vozidla vytvořit dostatečně velkou tak, aby byly zahrnuty všech změny proudění kolem karoserie do výpočtu. K tomu je vhodné volit rozměry alespoň jedné délky vozidla před, vedle a nad karoserií a asi tři až čtyř délky za vozidlem, kde dochází k úplavu. Dále je potřeba definovat oblasti domény, které budou zjemněny, pro zajištění přesného výpočtu všech zkoumaných veličin. Zjemňují se nejčastěji oblasti, kde předpokládáme náhlé změny proudění. Proto byly definovány dvě oblasti kolem celého modelu. Jedná v přímé blízkosti karoserie (boi_near) a druhá oblast o něco větší (boi_far), především v oblasti úplavu. Nakonec v prostředí Ansys SpaceClaim definujeme plochy vstupu a výstupu proudění, symetrie, země a volného proudu vzduchu jako v Ansys Discovery. Takto připravené plochy Fluent předem rozpozná a značně ulehčí práci při tvorbě sítě a definování okrajových podmínek.



Obr. 5-10 Doména a oblasti pro zjemnění sítě CFD analýzy

5.5.2 Tvorba sítě

Vhodně připravenou geometrii následně převedeme do prostředí Ansys Fluent Meshing, který nabízí velké množství funkcí pro tvorbu výpočetní sítě. Na začátku zvolíme pracovní postup jako Watertight geometry, tedy uzavřenou geometrii a v nastavení Double precision pro větší přesnost. Parametry nastavení pro generování výpočetní sítě jsou zapsány v tabulce 5-1, kde jsou především zmíněny hodnoty, které byly měněny a optimalizovány v průběhu simulací.

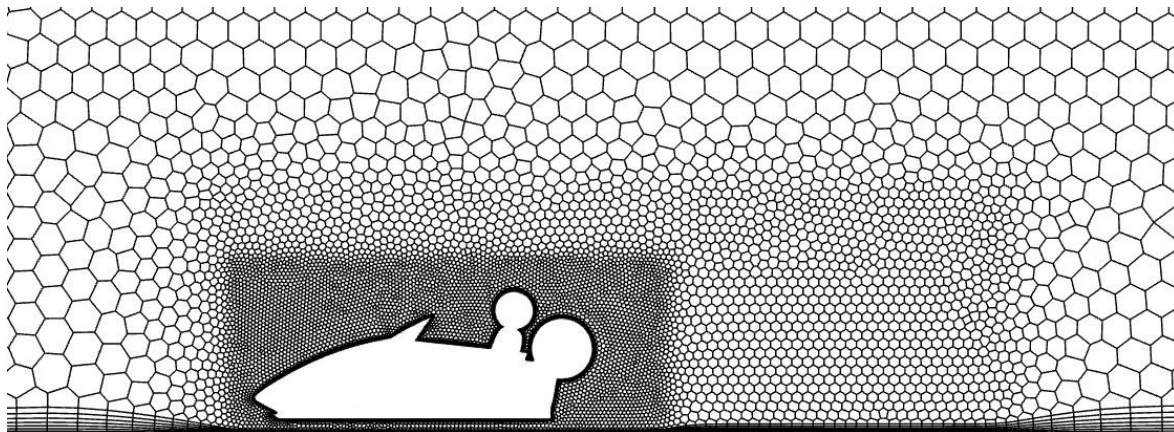
Tab. 5-1 Parametry a hodnoty výpočetní sítě

Výpočetní síť			
Zjemnění sítě			
Parametry	Oblasti zjemnění		
	boi_near	boi_far	car
Growth Rate	1,2	1,2	1,2
Size Control Type	Body Of Influence	Body Of Influence	Curvature
Target Mesh Size [m]	0,025	0,065	-
Min Size [m]	-	-	0,01
Max Size [m]	-	-	0,03
Curvature Normal Angle	-	-	18
Povrchová síť			
Parametry	Hodnoty		
Minimum Size [m]	0,01		
Maximum Size [m]	0,2		
Growth Rate	1,2		
Size Functions	Curvature & Proximity		
Curvature Normal Angle	18		
Cells Per Gap	3		
Scope Proximity To	edges		
Popis geometrie			
The geometry consists of only fluid regions with no voids			
Typy hraničních ploch			
Definovaný název ve SpaceClaim	Typ hranice		
car	wall		
ground	wall		
inlet	velocity-inlet		
outlet	pressure-outlet		
sky	wall		

symmetry	symmetry
Regiony	
Název regionu	Typ regionu
domain	fluid
Mezní vrstvy	
Parametry	Hodnoty
Offset Method Type	last-ratio
Number of Layers	7
Transition Ratio	0,2
First Layer Hight [m]	0,0016
Add in	fluid-regions
Grow on	car, ground
Generování objemové sítě	
Parametry	Hodnoty
Fill With	poly-hexcore
Peel Layers	1
Min Cell Length	0,01
Max Cell Length	0,16
Výsledná síť	
Parametry	Počet
Nodes	948132
Edges	4825
Faces	1849197
Cells	487511

Pro správnost výsledků je vhodně vytvořená síť zásadní, část výsledné sítě je zobrazena na obr. 5-11. Kromě zjemnění sítě v oblastech zájmu, je také potřeba mít dobře vytvořenou síť v místě mezní vrstvy. V tomto případě byla mezní vrstva modelována pomocí stěnových

funkcí, při kterých by doporučená hodnota bezrozměrné stěnové funkce y^+ měla být v rozsahu 30-300. Metoda modelování mezní vrstvy byla zvolena jako Last-Ratio a výška první vrstvy 1,6 mm. Pro odhad výšky první vrstvy byl využit webový kalkulač bezrozměrné stěnové funkce y^+ , který na základě vstupních parametrů proudění, tekutiny a požadované hodnoty y^+ vypočítá přibližnou výšku první vrstvy sítě.



Obr. 5-11 Část vygenerované sítě

5.5.3 Výpočet a okrajové podmínky

Po nastavení a vytvoření výpočetní sítě se přesuneme do výpočetního prostředí Ansys Fluent, kde je potřeba nastavit okrajové podmínky a výpočetní parametry. V příložené tabulce 5-2 jsou zapsány všechny hodnoty, které byly v rámci výpočtu definovány. Do výpočtu vstupuje velké množství parametrů. Zde jsou však zmíněny jen ty, které byly měněny. Ostatní zůstali ve výchozím nastavení, jelikož se většinou jedná o parametry, které jsou optimálně nastaveny pro velké množství využití a zasahuje se do nich v závislosti na řešeném problému nebo v případě problému s konvergencí. Do okrajových podmínek jsou automaticky převzaté pojmenované plochy z Ansys SpaceClaim, jako např. inlet (vstup), outlet (výstup), apod. Systém řešení byl zvolen jako Coupled, který počítá všechny rovnice společně a díky tomu dochází k rychlejší konvergenci. Metoda výpočtu výstupního tlaku, hybnosti apod. byla uvažována druhého řádu, která poskytuje vyšší přesnost. Před spuštěním výpočtu byla provedena hybridní inicializace, která do všech buněk vloží vstupní hodnotu jedna a provede deset iterací. Hodnoty desáté iterace jsou použity jako vstupní parametry pro výpočet. Na začátek bylo zvoleno tři sta iterací k pozorování počátečního průběhu výpočtu. Do grafů byly vykreslovány hodnoty aerodynamických součinitelů a residuí pro kontrolu konvergence. V případě, že by nedošlo k požadované konvergenci, musel by se následně zvýšit počet iterací nebo změnit parametry výpočtu.

Tab. 5-2 Parametry a hodnoty výpočtu a okrajových podmínek CFD analýzy

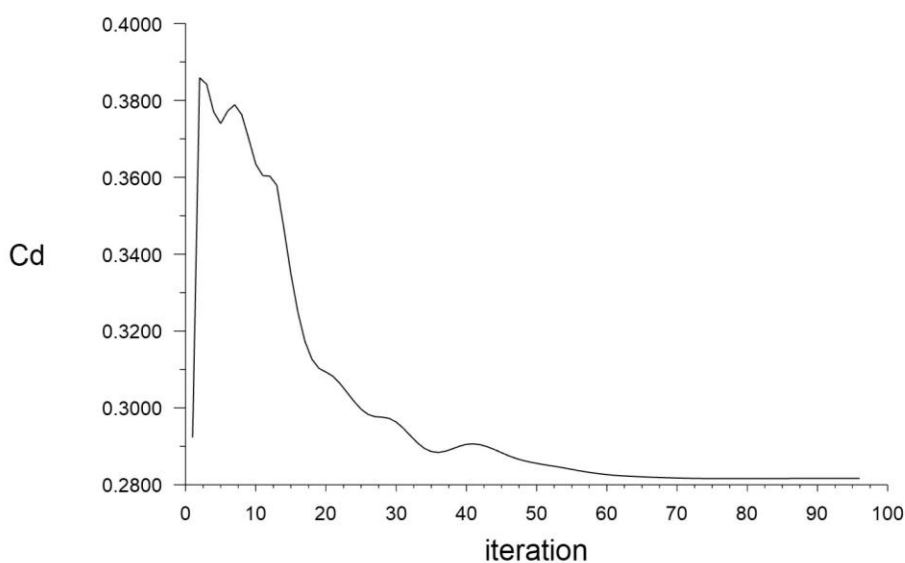
Parametry výpočtu		
Obecné nastavení		
Parametry	Hodnoty	Vlastnosti a nastavení
Solver	Pressure-Based	-
Velocity Formulation	Absolute	-
Time	Steady	-
Turbulence model	k- ω SST	Curvature Correction
Material	Air	Density 1,225 kg/m ³
Okrajové podmínky		
Parametry	Hodnoty	Vlastnosti a nastavení
Velocity Inlet	15 m/s	-
Pressure Outlet	Gauge Pressure 0 Pa	Average Pressure Specification
Symmetry	Symmetry	-
Car	Stationary Wall	No Slip
Ground	Moving Wall	Speed 15 m/s, Direction Z -1
Sky	Stationary Wall	Specified Shear [0;0;0]
Referenční hodnoty		
Parametry	Hodnoty	Vlastnosti a nastavení
Area	0,259 m ²	-
Velocity	15 m/s	-
Metody řešení		
Parametry	Metoda	
Scheme	Coupled	
Gradient	Least Squares Cell Based	
Pressure Outlet	Second Order	
Momentum	Second Order Upwind	
Turbulent Kinetic energy	Second Order Upwind	

Specific Dissipation Rate		Second Order Upwind	
Residua			
Parametry		Hodnoty	
Continuity		0,001	
Velocity x;y;z		0,001;0,001;0,001	
k		0,001	
omega		0,001	
Výpočet			
Inicializace		Hybrid Initialization	
Počet iterací		300	

5.5.4 Výsledky a úprava simulace

Navržená kapota

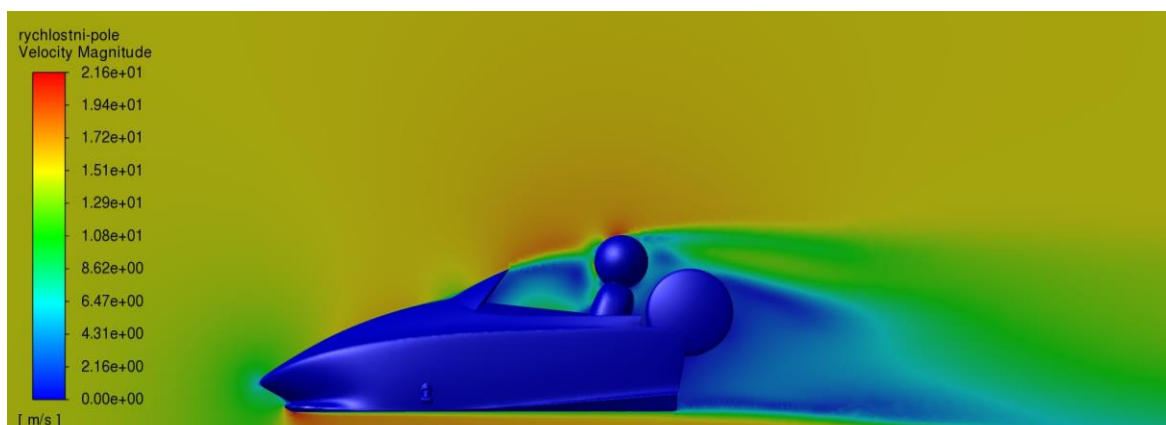
Po konvergenci výpočtu získáme požadované výsledky. Prostředí Ansys Fluent nabízí také celou řadu vykreslování kontur, proudnic apod. pro vizualizaci proudění. V našem případě jsou nejpodstatnější hodnoty aerodynamických součinitelů. Jak už bylo zmíněno ve výpočtu, tyto hodnoty byly vykreslovány do grafů. Průběh součinitele aerodynamického odporu je zobrazen na obr. 5-12.



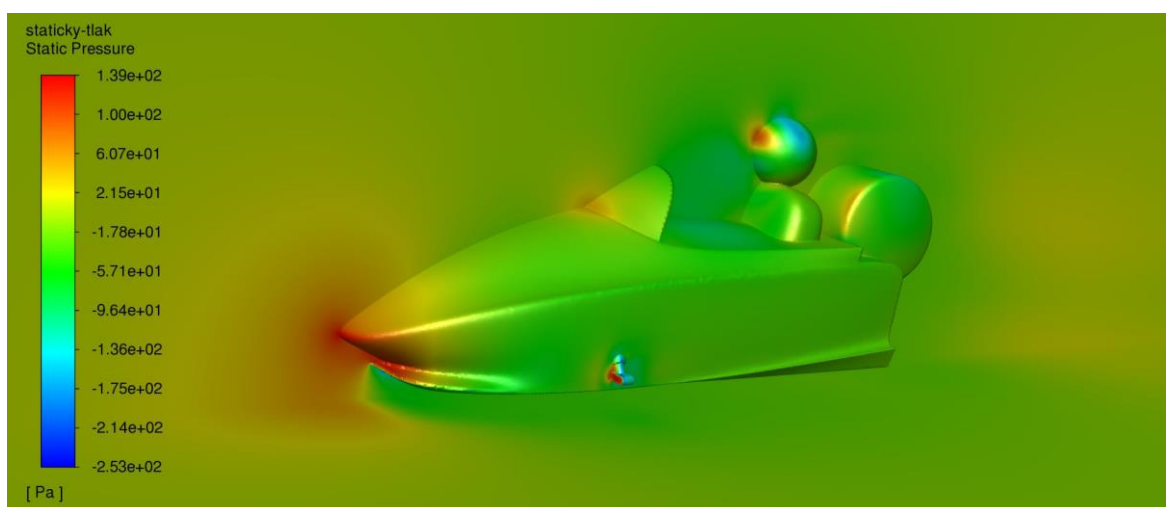
Obr. 5-12 Průběh součinitele aerodynamického odporu na počtu iterací

Z obrázku lze vidět počáteční fluktuaci hodnot, následně hodnoty rychle klesly a téměř po sto iteracích došlo k postupnému ustálení hodnoty na 0,282. V případě součinitele aerodynamického vztlaku se hodnota ustálila na -0,019.

Na obr. 5-13 je zobrazeno rychlostní pole kolem kapoty. V přední části lze vidět zpomalení proudění v důsledku nárazu vzduchu na kapotu. Odtud následně proudění začíná zrychlovat pod podvozkem a také na vrchní části kapoty. Oblasti maximální rychlosti proudění jsou zobrazeny červenou barvou. Vlivem sklopení přídavného deflektoru je zrychlený proud přenesen přes řidiče, což sníží působící protitlak. Modrá barva za vozidlem značí nízkou rychlost proudění a vznik podtlaku za vozidlem. Na obr. 5-14 zobrazující staticky tlak na ploše kapoty, lze vidět červené oblasti vozidla, na které působí největší tlaková síla způsobující odpor. Tyto oblasti bylo potřeba co nejvíce redukovat úpravami kapoty. Z kontur na obrázcích lze také usoudit turbulentní proudění na přechodu mezi kapotou a deflektorem. Tento nežádoucí jev společně s působícím tlakem na helmě řidiče byla snaha odstranit modifikací úhlu sklonu a výšky deflektoru. Zobrazené řešení však nakonec dosahovalo nejnižších hodnot odporu.

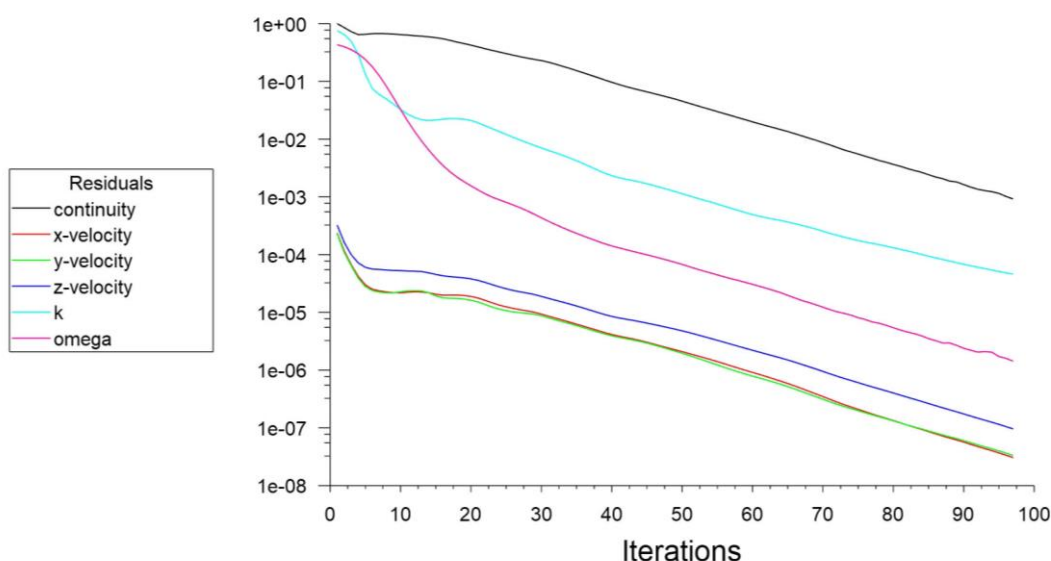


Obr. 5-13 Rychlostní pole kolem navržené kapoty



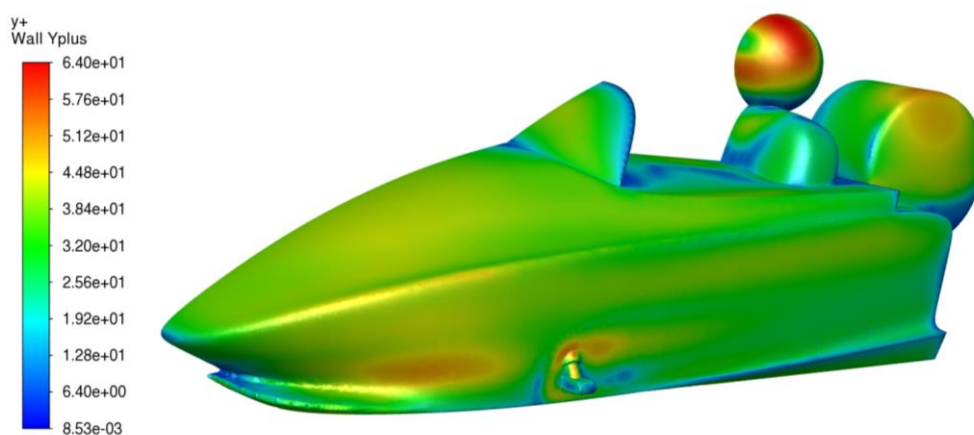
Obr. 5-14 Rozložení statického tlaku na navržené kapotě

Na obr. 5-15 je zobrazen průběh residuí. Došlo k poklesu téměř všech hodnot v průběhu výpočtu až pod nastavenou hodnotu 0,001. To znamená, že jsme dosáhli požadované přesnosti výpočtu, a protože se také ustálily hodnoty aerodynamických součinitelů, tak lze říci, že došlo ke konvergenci výpočtu a naměřené hodnoty jsou správné.



Obr. 5-15 Průběh residuí na počtu iterací při výpočtu nové kapoty

Pro kontrolu modelované mezní vrstvy pomocí bezrozměrné stěnové funkce y^+ lze vidět na obr. 5-16, že téměř na celém povrchu kapoty je hodnota y^+ v požadovaných mezích 30-300.

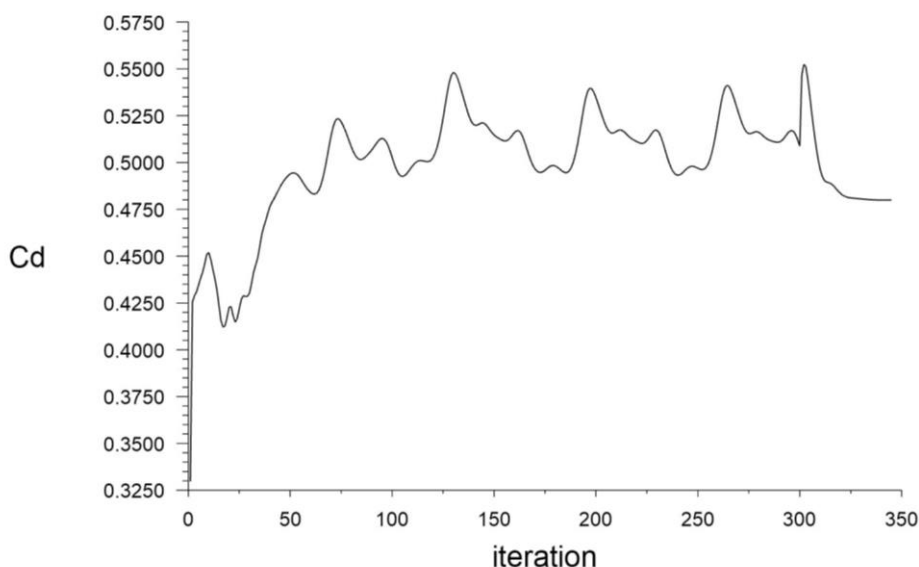


Obr. 5-16 Kontury stěnové funkce y^+ na navržené kapotě

Aktuální kapota

V případě analýzy aktuální kapoty Typhoonu bylo použito stejné nastavení simulace s výjimkou poloviny čelní plochy $0,26 \text{ m}^2$. Zde však nastal problém z konvergenčí. Residua začala kolísat kolem určité hodnoty a aerodynamické součinitele periodicky fluktovaly. Proto bylo potřeba upravit parametry výpočtu. Nejdříve došlo k úpravám sítě, což nemělo

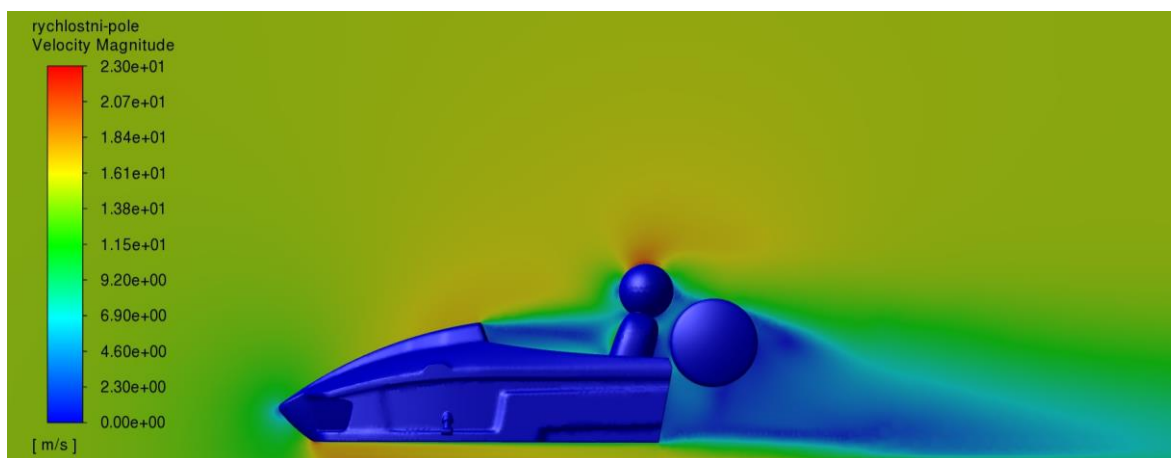
pozitivní dopad. Následně tedy byly měněny metody výpočtu a relaxační faktory. Většina úprav neměla požadovaný efekt a výsledek stále nekonvergoval. Nakonec tedy došlo jen ke změně metody výpočtu hybnosti proudění z druhého řádu na první řád. Průběh součinitele aerodynamického odporu pro aktuální kapotu je vykreslen na obr. 5-17, kde lze vidět fluktuaci hodnot do tři sta iterací při nastavení výpočtu na druhý řád. Po následném přepnutí na metodu prvního řádu u výpočtu hybnosti proudění se součinitel aerodynamického odporu rychle ustálil a residua klesla pod stanovenou hodnotu.



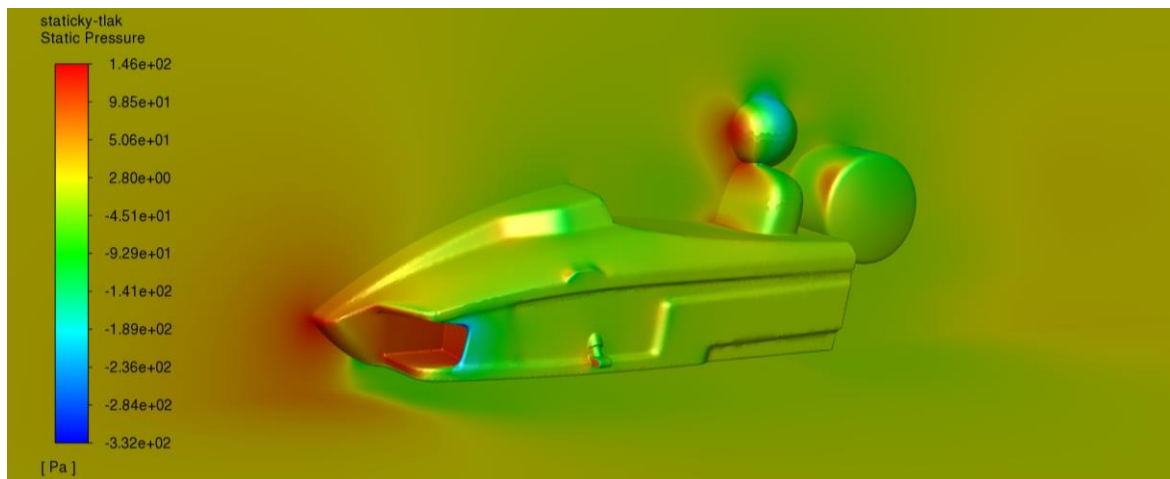
Obr. 5-17 Průběh součinitele aerodynamického odporu na počtu iterací u aktuální kapoty

Hodnoty se nakonec ustálily na 0,480 v případě součinitele aerodynamického odporu a -0,035 u součinitele aerodynamického vztlaku.

Z obr. 5-18 a 5-19 lze pozorovat podobné jevy popsané u navržené kapoty. Hlavní změna je v oblasti proudění a tlaku před řidičem, kde není deflektor. Proud vzduchu zrychlený na vrchní části kapoty naráží do řidiče, což způsobuje větší protitlak. Kontury statického tlaku na výčnělcích kapoty také značí zvýšení odporové síly.



Obr. 5-18 Rychlostní pole kolem aktuální kapoty



Obr. 5-19 Rozložení statického tlaku na aktuální kapotě

5.6 Porovnání výsledků navržené a aktuální kapoty

V této kapitole jsou vypočítány vybrané výkonnosti charakteristiky nově navržené kapoty a porovnány s aktuálně vyrobenou kapotou na pneumobil Typhoon.

5.6.1 Aerodynamický odpor a valivý odpor

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že se podařilo snížit součinitel aerodynamického odporu o 41 %. Dosazením všech veličin do rovnice pro aerodynamický odpor při rychlosti 15 m/s zjistíme sílu, která působí proti pohybu vozidla při dané rychlosti.

Nově navržená kapota:

$$F_{Dnova} = \frac{1}{2} \cdot C_{Dn} \cdot A_n \cdot \rho \cdot V^2 \quad (16)$$

$$F_{Dnova} = \frac{1}{2} \cdot 0,282 \cdot 0,518 \cdot 1,205 \cdot 15^2 = 19,802 \text{ N}$$

Aktuální kapota:

$$F_{Daktualni} = \frac{1}{2} \cdot C_{Da} \cdot A_a \cdot \rho \cdot V^2 \quad (17)$$

$$F_{Daktualni} = \frac{1}{2} \cdot 0,480 \cdot 0,52 \cdot 1,205 \cdot 15^2 = 33,0836 \text{ N}$$

Pokud tyto hodnoty porovnáme s valivým odporem pneumobilu, tak zjistíme, že aerodynamický odpor nově navržené kapoty při rychlosti 15 m/s je přibližně o 14 % nižší než valivý odpor. Při stejných podmínkách aerodynamický odpor aktuální kapoty je asi o 47 % větší než valivý odpor.

Valivý odpor:

$$F_V = f \cdot m \cdot g \quad (18)$$

kde f je součinitel valivého odporu [-], m hmotnost vozidla s řidičem v kg a g tíhové zrychlení m/s^2 .

$$F_V = 0,012 \cdot 200 \cdot 9,81 = 23,082 \text{ N}$$

5.6.2 Maximální rychlost

Dosáhnout co nejvyšší rychlost je žádoucí zejména v soutěžní kategorii Acceleration race, kde je zapotřebí co nejrychleji zajet dráhu délky 220 m. Současné pneumobily dosahují maximální rychlosti kolem 50 km/h, což je podmíněno otáčkami motoru a převodovým poměrem. Jelikož přesně nedokážeme určit jaká působí síla na hnacích kolech při této rychlosti, tak si výpočet zjednodušíme. Budeme uvažovat, že při maximální rychlosti 50 km/h současného pneumobilu Typhoon dosahuje hnací síla na kolech hodnoty odporových sil [1]:

$$F_H = f \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot C_{Da} \cdot A_a \cdot \rho \cdot V^2 \quad (19)$$

$$F_H = 0,012 \cdot 200 \cdot 9,81 + \frac{1}{2} \cdot 0,480 \cdot 0,52 \cdot 1,205 \cdot 13,888^2 = 52,088 \text{ N}$$

Stejnou hnací silou nyní budeme pohánět pneumobil Typhoon s novou kapotou. Dosazením do předchozí rovnice vypočítáme jeho maximální rychlost:

$$V_{MAXnova} = \sqrt{\frac{F_H - f \cdot m \cdot g}{\frac{1}{2} \cdot C_{Dn} \cdot A_n \cdot \rho}} \quad (20)$$

$$V_{MAXnova} = \sqrt{\frac{52,088 - 0,012 \cdot 200 \cdot 9,81}{\frac{1}{2} \cdot 0,282 \cdot 0,518 \cdot 1,205}} = 18,154 \text{ m/s} = 65,354 \text{ km/h}$$

Díky lepším aerodynamickým vlastnostem došlo k navýšení rychlosti o 15,354 km/h, což je zlepšení o 23,5 %.

Pokud zanedbáme potřebnou dráhu na rozjezd v Acceleration race a řekneme, že vozidlo pojede alespoň 100 m maximální rychlostí, tak pneumobil zajede tuto vzdálenost o 1,692 s rychleji s novou kapotou.

Čas na 100 m při maximální rychlosti s aktuální kapotou:

$$t_{aktualni} = \frac{x}{V_{MAXaktualni}} \quad (21)$$

$$t_{aktualni} = \frac{100}{13,888} = 7,2 \text{ s}$$

Čas na 100 m při maximální rychlosti s nově navrženou kapotou:

$$t_{nova} = \frac{x}{V_{MAXnova}} \quad (22)$$

$$t_{nova} = \frac{100}{18,154} = 5,508 \text{ s}$$

Výsledný čas závodu však bude ještě lepší, jelikož vozidlo bude lépe zrychlovat a na maximální rychlost se dostane v kratším čase.

5.6.3 Dojezdová vzdálenost

Kromě zlepšení času v Acceleration race je možné nižším odporem zvýšit dojezdovou vzdálenost v závodní kategorii Long distance race. Pro výpočet dojezdové vzdálenosti s novou kapotou budeme vycházet zjednodušeným výpočtem z aktuální kapoty. Nejdříve vypočítáme, jakou hnací sílu potřebuje pneumobil Typhoon s aktuální kapotou na udržení rychlosti 16 km/h, která se dodržuje, jelikož dle pravidel je nutné jet rychleji než 15 km/h.

$$F_{HLDaktualni} = f \cdot m \cdot g + \frac{1}{2} \cdot C_{Da} \cdot A_a \cdot \rho \cdot V^2 \quad (23)$$

$$F_{HLDaktualni} = 0,012 \cdot 200 \cdot 9,81 + \frac{1}{2} \cdot 0,480 \cdot 0,52 \cdot 1,205 \cdot 4,444^2 = 26,053 \text{ N}$$

Současné pneumobily dosahují maximální dojezdovou vzdálenost na jednu tlakovou láhev okolo 7000 m. Čas, než ujedou tuto vzdálenost při rychlosti 16 km/h je tedy 1575 s.

$$t_{LD} = \frac{x_{LDaktualni}}{V_{LDaktualni}} \quad (24)$$

$$t_{LD} = \frac{7000}{4,444} = 1575 \text{ s}$$

Budeme-li uvažovat, že pneumobil s novou kapotou bude vyvíjet stejnou hnací sílu při stejných otáčkách motoru jako s aktuální kapotou, tudíž mu dojde palivo za stejnou dobu. Díky nižšímu aerodynamickému odporu však dojde k navýšení rychlosti, a tedy ke zvýšení dojezdu za daný časový úsek.

Rychlost u Long distance race s novou kapotou:

$$V_{LDnova} = \sqrt{\frac{F_{HLDaktualni} - f \cdot m \cdot g}{\frac{1}{2} \cdot C_{Dn} \cdot A_n \cdot \rho}} \quad (25)$$

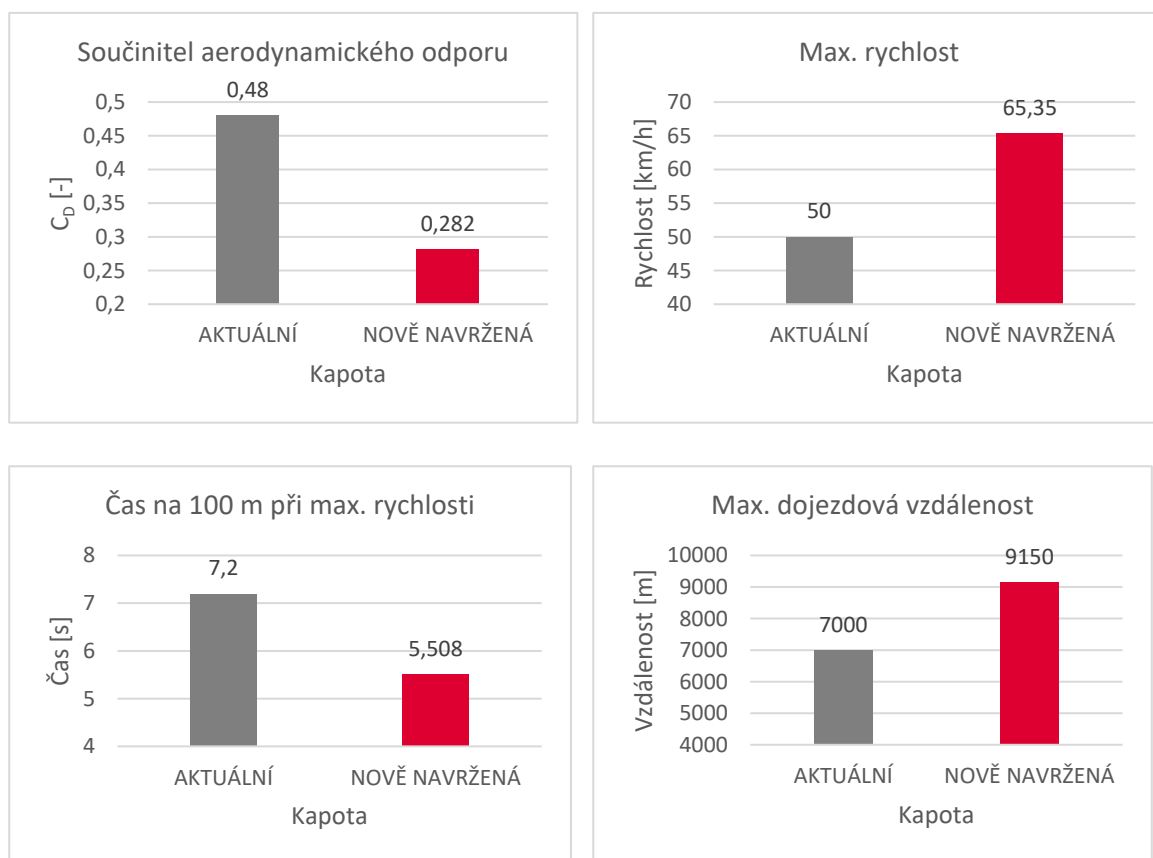
$$V_{LDnova} = \sqrt{\frac{26,053 - 0,012 \cdot 200 \cdot 9,81}{\frac{1}{2} \cdot 0,282 \cdot 0,518 \cdot 1,205}} = 5,81 \text{ m/s} = 20,915 \text{ km/h}$$

Nově dosažená maximální dojezdová vzdálenost:

$$X_{LDnova} = V_{LDnova} \cdot t_{LD} \quad (26)$$

$$X_{LDnova} = 5,81 \cdot 1575 = 9150,207 \text{ m}$$

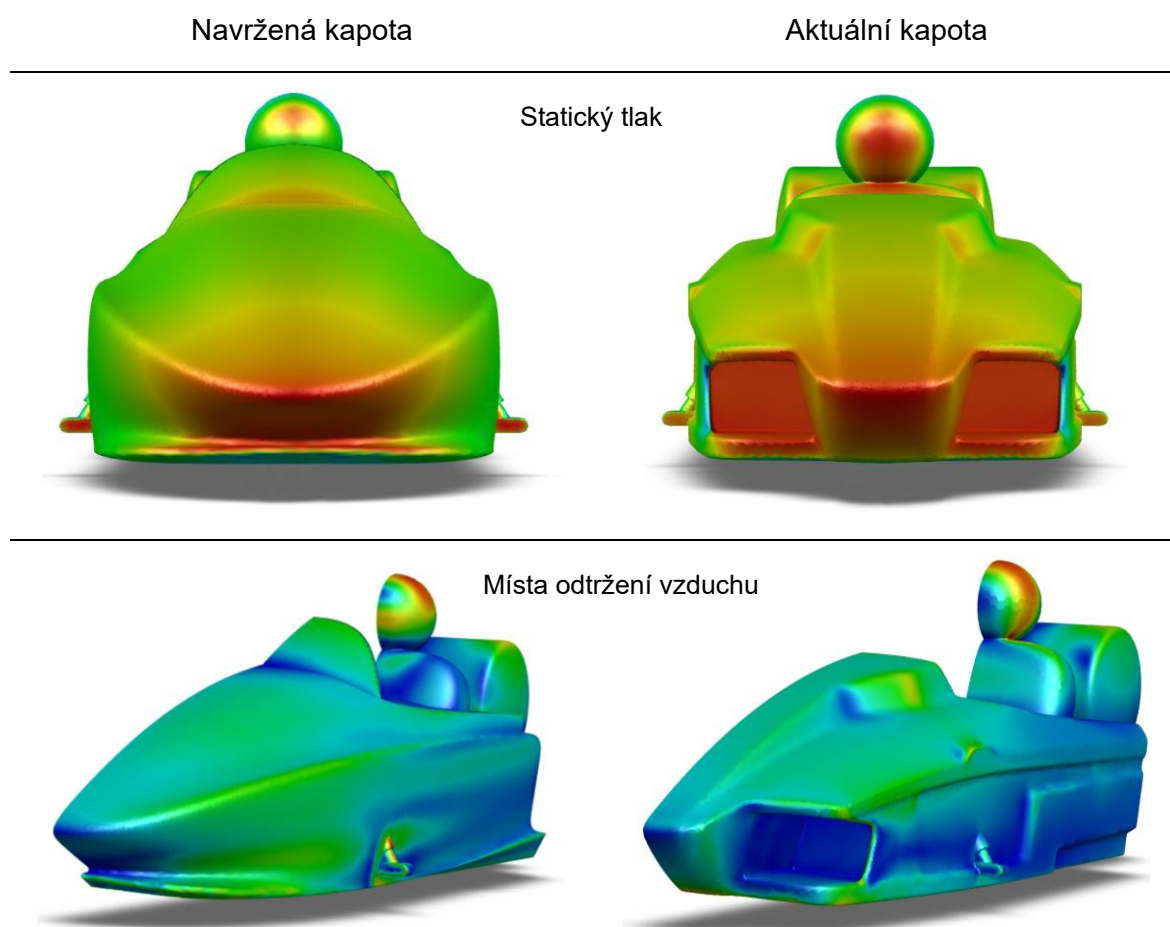
Z výpočtu vyplývá, že nižší odpor působící na pneumobil s novou kapotou zvýší rychlost o 4,915 km/h a díky tomu ujede pneumobil za stejnou dobu delší vzdálenost asi o 2150 m.



Obr. 5-20 Grafy porovnávající vliv kapot na výkonnostní parametry pneumobilu

6 DISKUZE

Zvolením finálního řešení z navržených koncepčních variant na základě nejnižšího aerodynamického odporu nelze říct, že se jedná o tvarování, které je z hlediska aerodynamických vlastností neoptimálnější. Najít takový tvar je velmi obtížné z důvodu velké variability a v současné době neexistuje způsob, který by zaručil a potvrdil, že se podařilo dosáhnout nejnižší možné hodnoty součinitele aerodynamického odporu. K takové hodnotě se dá teoreticky jen velmi blízko přiblížit na základě neustálého testování a modifikování určitých tvarových řešení. V této práci bylo prozkoumáno jen několik možných návrhů, jejichž základ vycházel z poznatků současného stavu poznání. Přestože některé koncepční návrhy proběhly desítkami úprav, tak by s velkou pravděpodobností bylo možné nalézt takovou kombinaci tvarování, která by dosáhla ještě lepších hodnot. Dalo by se třeba uvažovat o vytvoření plochého podvozku zakrytím karoserie, přidáním aerodynamických prvků u kol a náprav nebo prodloužení a zakrytí zadní části, která by snížila vznik úplavu. Možností je celá řada, jejichž efekt by se musel ověřit. V takových případech je však potřeba uvažovat v komplexním měřítku, jestli změnou nezvýšíme příliš hmotnost a zda je daná změna vhodná pro soutěžní kategorie pneumobilů.

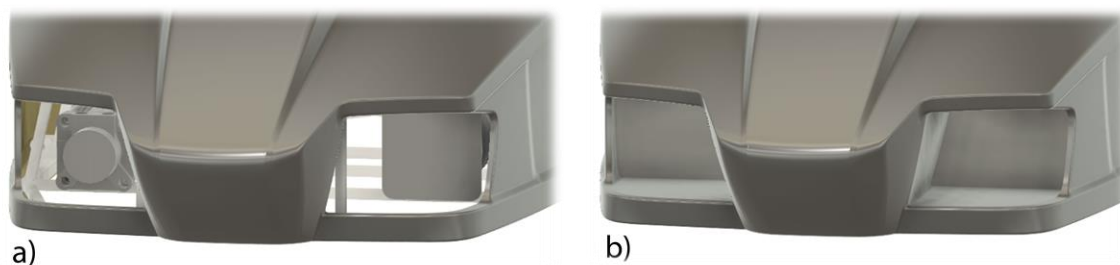


Obr. 6-1 Statický tlak a místa odtržení vzduchu kapot

Pozorováním kontur navržené a aktuální kapoty lze vidět zásadní rozdíl ve statickém tlaku. U aktuální kapoty nejenom, že je rozložen na podstatně větší ploše, ale navíc dosahuje vyšší hodnoty. Hlavní podstatnou rozdílu je čelní tvarování, které je u nové kapoty koncipováno do oblých tvarů, a přídavný deflektor, který snižuje působící tlak na řidiče. Navržená kapota byla již od samotného počátku tvarována v plynulých a hladkých plochách nejenom ke snížení působícího tlaku, ale taky k redukci odtrhávání proudu vzduchu od povrchu a vzniku nežádoucích turbulencí. Z obr. 6-1, kde tmavě modrá barva znázorňuje místa odtržení vzduchu od povrchu je patrné, že se podařilo značně snížit nežádoucí odtrhávání proudění.

Pokud bychom dosaženou hodnotu součinitele aerodynamického odporu navržené kapoty srovnali s osobními automobily, tak se dostaneme do kategorie lépe aerodynamicky řešených vozidel. Dosažené hodnoty z CFD simulací však nejsou zcela přesné a ve skutečnosti budou s největší pravděpodobností vyšší, jelikož jsme předpokládali řadu zjednodušení ve výpočtu. Do výpočetní analýzy nebyla zahrnuta geometrie rámu, přední nápravy a kola z důvodu omezené výpočetní kapacity studentské verze Ansys Fluent. Toto zjednodušení nemělo výrazný vliv na porovnání rozdílu nově navržené kapoty s aktuálně vyrobenou, jelikož bylo uvažováno v obou případech. Na druhou stranu i rozdíl mezi těmito kapotami bude nejspíš v realitě mírně odlišný. Důvodem je přední tvarování kapoty, které rozděluje vzduch do několika směrů kolem pneumobilu. Dle toho určité množství vzduchu může v jednom případě více interferovat s přední nápravou kol a v druhém případě naopak více se zadním rámem a vzdušníkem, což ve výsledku bude způsobovat mírné odchylky.

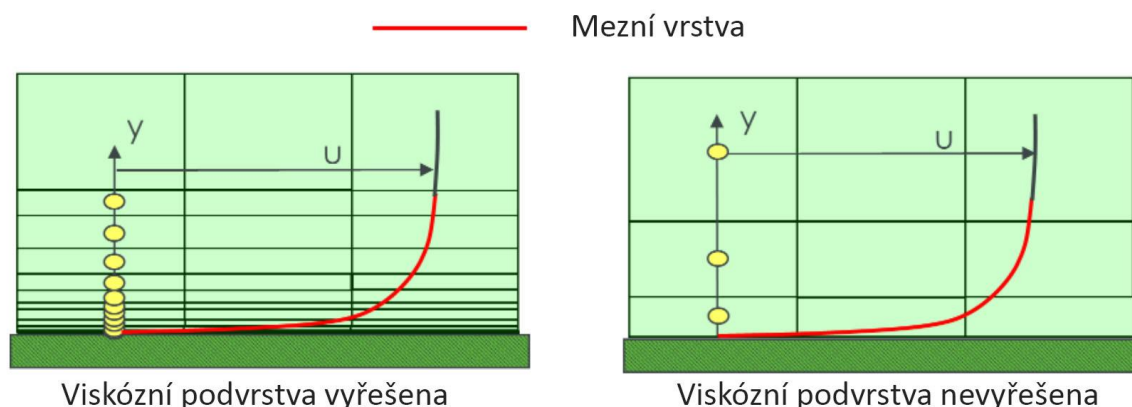
Dalším zjednodušením ve výpočtu, a tedy dopuštění se malé odlišnosti od reality je upravená geometrie a nastavení simulace aktuální kapoty. Kapota má v přední části otvory pro snadnou výměnu tlakové láhve. V tomto místě došlo k úpravě modelu a otvory byly pro analýzu uzavřeny, jelikož se za nimi nachází součásti pneumobilu. Ve skutečnosti však tudy bude částečně proudit vzduch, který narazí na vnitřní součásti, zavíří se a zadní částí vyletí. Prakticky by tedy odpor vzduchu mohl být o něco nižší, protože proud nebude stagnovat na čelní ploše, ale turbulentním prouděním proletí přes vozidlo.



Obr. 6-2 Rozdíl mezi a) reálnou a b) zjednodušenou aktuální kapotou pro CFD analýzu

Při analyzování aktuální kapoty pomocí CFD se nepodařilo zkonvergovat výsledek při stejném nastavení jako v případě nově navržené kapoty. Tento problém by pravděpodobně vyřešila lepší kvalita sítě, která však byla omezena. Muselo se přejít na metodu prvního řádu u výpočtu hybnosti vzduchu. Tato metoda je méně přesná, tudíž výsledná hodnota součinitele aerodynamického odporu aktuální kapoty může být ve skutečnosti mírně odlišná. Pokud se však podíváme na obr. 5-17 v konstrukčním řešení, kde je zobrazen průběh hodnot tohoto součinitele v závislosti na počtu iterací, tak můžeme vidět počátečních tři sta iterací, které probíhaly při stejném nastavení hybnosti jako u nově navržené kapoty, tedy druhého řádu. Z důvodu fluktuace hodnot se přešlo na metodu prvního řádu a výsledek se ustálil na nižších hodnotách, než mezi kterými součinitel kolísal při metodě druhého řádu. Z toho lze usuzovat, že přesnější hodnota může být v tomto případě spíše vyšší.

V případě dostatečného množství výpočetní sítě a výkonu je také vhodné modelovat celý rychlostní gradient mezní vrstvy v rámci sítě. V tomto případě byla viskózní podoblast mezní vrstvy počítána pomocí stěnových funkcí, které ji dopočítají pomocí empirického předpokladu. [28] Tento přístup je vhodnější spíše pro zkoumání proudění uprostřed domény. Při řešení aerodynamického odporu a působícího tlaku na stěny je vhodnější využít dostatečně hustou síť v oblasti mezní vrstvy, která vypočítá viskózní laminární podvrstvu přímo v rámci buněk sítě. Na obr. 6-3 je zobrazen rozdíl mezi modelováním mezní vrstvy pomocí stěnových funkcí a dostatečně hustou sítí.



Obr. 6-3 Modelování mezní vrstvy pomocí husté sítě (vlevo) a stěnových funkcí (vpravo) [28]

Pro dosažení zcela přesných hodnot aerodynamických součinitelů je nejvhodnější otestovat navrhované řešení v provozu. V případě aerodynamiky vozidel se v praxi postupuje tak, že se vozidlu nejprve naměří aerodynamické charakteristiky v aerodynamickém tunelu. Následně se vytvoří simulace s optimálním nastavením, která bude generovat výsledky shodné s těmi naměřenými. Díky tomuto postupu lze snížit finanční náročnost a rychlost testování s předpokladem správných výsledků. V tomto případě však nebyl prostor ani cíl práce vyrobit navrhovaného řešení a měřit jeho aerodynamických vlastnosti v praxi.

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá problematikou aerodynamického odporu vozidel, konkrétně závodního pneumobilu Typhoon vyvíjeného na FSI VUT. Cílem práce bylo navrhnout tvar kapoty pro zmíněný pneumobil tak, aby dosahoval co nejnižšího aerodynamického odporu. K tomuto účelu byly využity CFD simulace, podle kterých je možné vyhodnocovat a upravovat navrhované řešení.

Podnětem k řešení této problematiky bylo především zlepšení výkonnostních parametrů pneumobilu na základě aerodynamických vlastností, které doposud nebyly u tohoto typu vozidla podrobněji řešeny. Důvodem řešení problému je stále se zvyšující rychlost pneumobilů, při kterých význam aerodynamických vlastností hraje zásadní roli. Současné kapoty pneumobilů byly doposud řešeny převážně z designérského hlediska a tato práce měla ukázat, jaký vliv na zlepšení výkonnosti může mít kapota, která bude více zaměřena na aerodynamiku.

První část práce se zabývá současným stavem poznání v oblasti aerodynamiky vozidel. Stručně je popsána mechanika proudícího vzduchu a jeho účinků na jedoucí automobil. Dále je zde zmíněn vliv tvarových prvků vozidel na obtékání vzduchu kolem vozu a s tím spojený vznik aerodynamických sil. Nakonec je popsán a vysvětlen princip vybraných přídavných aerodynamických prvků vozidel. Druhá část rešerše stručně pojednává o CFD simulacích, jejich principu, funkci a využití v průmyslové a vědecké praxi.

Dle provedené rešerše bylo vytvořeno několik koncepčních návrhů, které byly průběžně upravovány na základě CFD simulací tak, aby dosahovaly požadovaných vlastností. Z těchto variant byla vybrána jedná finální, která dosahovala nejnižšího odporu. Součinitel aerodynamického odporu finální varianty dosáhl hodnoty 0,282. Díky tomu se podařilo snížit tento součinitel oproti aktuálně vyrobené kapotě o 41 %, což se dle provedených výpočtů ukázalo jako zásadní na výkonnostní parametry vozidla. Uvedené hodnoty se však v praxi budou mírně lišit, protože došlo ke zjednodušení v CFD simulacích.

V další fázi by proto bylo vhodné provést simulace se všemi částmi vozidla. Následně navrženou kapotu vyrobit a ověřit jak její aerodynamické vlastnosti v reálném provozu, tak zmiňovaný vliv na jízdní parametry pneumobilu. Na základě provedených měření by se mohl v případě potřeby vylepšit výpočetní model, který by uvažoval celou geometrii vozidla tak, aby se výsledky shodovaly s reálným měřením.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. *Aerodynamika vozidel*. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01942-X.
- [2] WOLF-HEINRICH, Hucho. *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering*. 1. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1987. ISBN 0408014229.
- [3] URBAN, Ondřej. *Fyzikální vlastnosti kapalin* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/18skIL8WM8-M2Ma5UEBbrPsQAIAHad2nS/view>. Prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] Viscosity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>
- [5] HOUGHTON, E. L. a P. W. CARPENTER. *Aerodynamics for Engineering Students*. 5. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 978-0750651110.
- [6] MUŽÍKOVÁ, Markéta. *Aerodynamika vozidel* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/101199?zp_id=101199. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [7] URBAN, Ondřej. *Úvod do hydrodynamiky, proudění ideální kapaliny* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1oLTWRBnw4IvmZXF87-BgTjG92dWBJF6e/view>. Prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [9] Navierova–Stokesova rovnice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Navierova%E2%80%93Stokesova_rovnice
- [10] LEVIN, Johan a Rikard RIGDAL. *Aerodynamics analysis of drag reduction devices on the underbody for SAAB 9-3 by using CFD*. Göteborg, 2011. Diplomová práce. Chalmers university of technology.

- [11] JANALÍK, Jaroslav. *Obtékání a odpor těles* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Janalik-Obtekani.pdf>. Skriptum. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [12] MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. 1. Yeovil: Haynes Publishing, 2006. ISBN 1 84425 230 2.
- [13] OBIDI, T. Yomi. *Theory and Applications of Aerodynamics for Ground Vehicles*. Warrendale: SAE International, 2014. ISBN 978-0768021110.
- [14] HEISLER, Heinz. *Advanced Vehicle Technology*. 2. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 07-506-5131-8.
- [15] STIBOROVÁ, Dana. *Aktivní aerodynamické prvky osobních vozidel* [online]. Brno, 2017 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149822. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Vančura, Ph.D.
- [16] *Tequipment Finder Porsche* [online]. Stuttgart: Porsche, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://tequipmen-finder.porsche.com/cyprus/J1/Taycan/&ac=product&pr=FF6529F7F2B05B6CC1257C770039ADC4>
- [17] KATZ, Joseph. *Automotive Aerodynamics*. 1. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. ISBN 978-1119185727.
- [18] YADAV, Aanchal, Pooja RAWAL a R. K. MISHRA. Modelling and simulation of aerodynamic performance of Vortex generators for hatch back type cars. In: *JVE Journals* [online]. 2018 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.jvejournals.com/article/20399>
- [19] ISLAM, Md. Rasedul, Md. Amzad HOSSAIN, Mohammad MASHUD a Md. Tanvir Ibny GIAS. Drag Reduction of a Car by Using Vortex Generator. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [online]. 2013, 4(7), 5 [cit. 2021-02-15]. ISSN 2229-5518. Dostupné z: <https://www.ijser.org/researchpaper/Drag-Reduction-of-a-Car-by-Using-Vortex-Generator.pdf>

- [20] Vortex Generators. In: *Team Arics* [online]. 2018 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://teamarcis2018.wordpress.com/2017/11/11/vortex-generators/>
- [21] Diffuser (automotive). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuser_\(automotive\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuser_(automotive))
- [22] BARTÁK, Martin. *Počítačové simulace proudění (CFD) ve větrání a klimatizaci*. Praha, 2002. Příspěvek. České vysoké učení technické.
- [23] FERZIGER, Joel H. a Milovan PERIĆ. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3. Berlin: Springer, 2002. ISBN 978-3540420743.
- [24] CRUZ, Luis Miguel de la a Daniel MONSIVAIS. Parallel numerical simulation of two-phase flow model in porous media using distributed and shared memory architectures. In: *Scielo* [online]. 2013 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <http://www.scielo.org.mx/img/revistas/geoint/v53n1/a5f1.jpg>
- [25] VRBA, Pavel. *Řešení proudění v pokusném kanálu pomocí CFD* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/25314/1/Bakalarska%20prace_Vrba.pdf. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Roman Gašpár.
- [26] VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění* [online]. Praha [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. České vysoké učení technické.
- [27] Free Simscale webinar on optimising racecars with CFD. In: *Racecar engineering* [online]. [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/simscale-webinar-optimising-racecars-with-cfd/>
- [28] Computational fluid dynamics. *Leap australia* [online]. Australia, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus_part1_understanding-the-physics-of-boundary-layers/

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratky:

FSI	Fakulta strojního inženýrství
VUT	Vysoké učení technické
CFD	Computational Fluid Dynamics
HVAC	Heat, Ventilation and Air Conditioning
SUV	Sport Utility Vehicle
VG	Vortex Generator
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes equations
SST	Shear Stress Transport
CAD	Computer-Aided Design

Fyzikální veličiny:

η	dynamická viskozita
τ	tečné napětí mezi vrstvami laminárního proudění
$\frac{dy}{dv}$	gradient rychlosti v kolmém směru na směr rychlosti proudění
ν	kinematická viskozita
ρ	hustota kapaliny
Re	Reynoldsovo číslo
v_s	střední hodnota rychlosti proudění tekutiny
d	charakteristický rozměr obtékaného tělesa
t	čas
\vec{v}	vektor rychlosti proudící tekutiny
Q	hmotností průtok tekutiny
S	průtočnou plochu
v	rychlost proudění tekutiny

p	tlak tekutiny
g	tíhové zrychlení
h	výška nad hladinou nulové potenciální energie
F_D, F_L, F_Y	aerodynamická odporová, vztlaková a boční síla
M_R, M_M, M_N	aerodynamický klopový, klonivý a zatáčivý moment
C_D, C_L, C_Y	součinitel aerodynamické odporové, vztlakové a boční síly
C_R, C_M, C_N	součinitel aerodynamického klopivého, klonivého a zatáčivého momentu
A	čelní plocha vozidla
V	rychlost vozidla
l	rozvor vozidla
D_i	odpor indukovaný vztlakovou silou
$\sin \varepsilon$	úhel odklonění vztlakové síly
k	konstanta odporu indukovaného vztlakovou silou
F_{Dnova}	aerodynamická odporová síla nové kapoty
C_{Dn}	součinitel aerodynamického odporu nové kapoty
A_n	čelní plocha nové kapoty
$F_{Daktualni}$	aerodynamická odporová síla aktuální kapoty
C_{Da}	součinitel aerodynamického odporu aktuální kapoty
A_a	čelní plocha aktuální kapoty
F_V	valivý odpor
f	součinitel valivého odporu
m	hmotnost vozidla
F_H	hnací síla na kolech vozidla
$V_{MAXnova}$	maximální rychlost vozidla s novou kapotou
x	vzdálenost
$t_{aktualni}$	čas vozidla s aktuální kapotou
t_{nova}	čas vozidla s novou kapotou
$F_{HLDaktualni}$	hnací síla na kolech vozidla s aktuální kapotou u long distance race

$x_{LDaktualni}$	dojezdová vzdálenost vozidla s aktuální kapotou
t_{LD}	čas jízdy vozidla v long distance race
$V_{LDaktualni}$	rychlost vozidla s aktuální kapotou v long distance race
V_{LDnova}	rychlost vozidla s novou kapotou v long distance race
X_{LDnova}	dojezdová vzdálenost vozidla s novou kapotou

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Znázornění průběhu laminárního proudění [6].....	15
Obr. 2-2 Znázornění průběhu turbulentního proudění [6].....	16
Obr. 2-3 Znázornění působení aerodynamických účinků na vozidlo při jízdě [2].....	18
Obr. 2-4 Průběh odporů při jízdě vozidla [10]	20
Obr. 2-5 Rozložení tlaků na válci ve nevazkém a vazkém prostředí [1]	21
Obr. 2-6 Výška a rychlostních profily laminární a turbulentní mezní vrstvy [11].....	22
Obr. 2-7 Průběhu a odtržení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [11].....	23
Obr. 2-8 Vliv změny mezní vrstvy na koeficient aerodynamického odporu kruhové tyče [1]	23
Obr. 2-9 Odtržení proudu vzduchu a vznik úplavu za vozidlem [12].....	24
Obr. 2-10 Rozložení tlaků na povrchu karoserie při jízdě automobilu [1]	26
Obr. 2-11 Vliv působení boční síly na stabilitu vozidla [1]	27
Obr. 2-12 Vliv polohy náběžné hrany na aerodynamické součinitele [1]	28
Obr. 2-13 Vliv tvaru zadní části vozidla na aerodynamické součinitele [1]	29
Obr. 2-14 Vliv půdorysného zakřivení zádě na součinitel aerodynamického odporu [1] ..	30
Obr. 2-15 Vliv oblé střechy na aerodynamický koeficient odporu [14].....	30
Obr. 2-16 Vliv zaoblení bočnic automobilu na koeficient aerodynamického odporu [14]	31
Obr. 2-17 Vliv změny tvaru přídě a předního spoileru na výsledný aerodynamický odpor [1] upraveno	32
Obr. 2-18 Změna aerodynamických sil vyvolaná přídatným zadním spoilerem [1]	33
Obr. 2-19 Jedno z možných řešení bočního spoileru [16] upraveno.....	33
Obr. 2-20 Generátory vírů na konci střechy automobilu [20].....	34
Obr. 2-21 Vliv tvaru zadní části podvozku na koeficient aerodynamického odporu [14] .	35
Obr. 2-22 Kontrolní objem ve 3D a 2D prostoru [24]	36
Obr. 2-23 Vizualizace proudění pomocí CFD simulace kolem závodí formule [27].....	40
Obr. 4-1 Schéma postupu práce návrhu kapoty.....	42
Obr. 4-2 Vizualizace varianty I.....	43
Obr. 4-3 Průběh vývoje a modifikací varianty I	43
Obr. 4-4 Vizualizace varianty II.....	44

Obr. 4-5 Průběh vývoje a modifikací varianty II.....	44
Obr. 4-6 Vizualizace varianty III	45
Obr. 4-7 Průběh vývoje a modifikací varianty III.....	45
Obr. 4-8 Vizualizace varianty IV	46
Obr. 4-9 Průběh vývoje a modifikací varianty IV	46
Obr. 4-10 Připravená geometrie a okrajové podmínky v Ansys Discovery	47
Obr. 4-11 Vizualizace proudění kolem vozidla v Ansys Discovery.....	47
Obr. 4-12 Graf zobrazující hodnoty součinitele aerodynamického odporu koncepčních variant	48
Obr. 5-1 Vizualizace nově navržené kapoty	49
Obr. 5-2 Aerodynamické prvky kapoty z profilu	49
Obr. 5-3 Aerodynamické prvky kapoty z čelního a půdorysného pohledu	50
Obr. 5-4 Detaily finálního řešení navržené kapoty	51
Obr. 5-5 Části kapoty po rozdělení.....	51
Obr. 5-6 Základní rozměry kapoty	52
Obr. 5-7 Vizualizace pohledu z místa řidiče.....	53
Obr. 5-8 Postup výpočtu CFD analýzy	54
Obr. 5-9 Zjednodušená geometrie CFD simulace.....	55
Obr. 5-10 Doména a oblasti pro zjemnění sítě CFD analýzy	55
Obr. 5-11 Část vygenerované sítě	58
Obr. 5-12 Průběh součinitele aerodynamického odporu na počtu iterací.....	60
Obr. 5-13 Rychlostní pole kolem navržené kapoty.....	61
Obr. 5-14 Rozložení statického tlaku na navržené kapotě	61
Obr. 5-15 Průběh residuí na počtu iterací při výpočtu nové kapoty	62
Obr. 5-16 Kontury stěnové funkce y^+ na navržené kapotě.....	62
Obr. 5-17 Průběh součinitele aerodynamického odporu na počtu iterací u aktuální kapoty	63
Obr. 5-18 Rychlostní pole kolem aktuální kapoty	63
Obr. 5-19 Rozložení statického tlaku na aktuální kapotě	64
Obr. 5-20 Grafy porovnávající vliv kapot na výkonnostní parametry pneumobilu	67

Obr. 6-1 Statický tlak a místa odtržení vzduchu kapot.....	68
Obr. 6-2 Rozdíl mezi a) reálnou a b) zjednodušenou aktuální kapotou pro CFD analýzu.	69
Obr. 6-3 Modelování mezní vrstvy pomocí husté sítě (vlevo) a stěnových funkcí (vpravo)	
[28]	70

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Koeficienty aerodynamického odporu základních těles [6] upraveno	20
Tab. 5-1 Parametry a hodnoty výpočetní sítě.....	56
Tab. 5-2 Parametry a hodnoty výpočtu a okrajových podmínek CFD analýzy.....	59

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: 3D model navržené kapoty

Příloha 2: Návrhový výkres navržené kapoty